

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA



TESIS DOCTORAL

**Impacto y consecuencias de la congestión de las
infraestructuras de transporte en el sistema usos del suelo-
transporte-sociedad**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Borja Moya Gómez

Director

Juan Carlos García Palomares

Madrid, 2019

Impacto y consecuencias de la congestión de las infraestructuras de transporte en el sistema usos del suelo – transporte – sociedad

Tesis doctoral

Autor: Borja Moya Gómez

Director: Dr. Juan Carlos García Palomares

Programa de doctorado de Geografía | Facultad de Geografía e Historia

Julio 2018



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

“El mundo es una máquina compleja que no se desmonta con un destornillador.

*Pero no por ello hemos de dejar de observar, de tratar de comprender,
de especular, de discutir, de sugerir en ocasiones tal o cual vía de reflexión.”*

Amin Maalouf, 1999

Resumen

La congestión en la red viaria es un fenómeno que se produce por la existencia de una demanda próxima o superior a la que se puede ofrecer los diferentes elementos que forman esa red en ese instante. El tráfico experimenta velocidades inferiores a las de situaciones de flujo libre y, por lo tanto, aumenta el tiempo de viaje para recorrer los arcos congestionados. La congestión suele presentar unos patrones característicos dependiendo del tipo de vía que sea, tanto en intensidad como en horas en las que se produce. Además, la congestión produce efectos *Spillover* que deforman la ciudad de manera desigual y afectan a cómo se puede interactuar con las oportunidades disponibles.

El objetivo de la tesis doctoral es evaluar y cartografiar cómo la congestión recurrente de las carreteras, la congestión que se produce en circunstancias normales, altera los valores de potencial de interacción, también conocida como accesibilidad, con coche a lo largo del día para las diferentes áreas altamente densas de la Unión Europea elegidas como áreas de estudio: las áreas metropolitanas de Barcelona (ES), Berlín (DE), Hamburgo (DE), Londres (GB), Madrid (ES), Milán (IT), París (FR) y Roma (IT), y el conjunto de los Países Bajos (NL). De la misma manera, se ha estudiado para el caso de Madrid como el cambio continuo de oportunidades puede mitigar o exacerbar los efectos de la congestión.

Para llevar a cabo esta investigación se han realizado una serie de modificaciones del indicador de accesibilidad potencial, que permiten incorporar explícitamente la componente temporal. Los datos usados para la definición de las redes, que incluye observaciones realizadas por la empresa de navegadores TomTom®, y el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten tener en cuenta el tiempo real medio experimentado de cada ruta, considerando la velocidad del momento en que cada ruta usa cada arco. El caso de oportunidades dinámicas, se usa una aproximación obtenida por el uso de la ciudad por parte de los usuarios de Twitter.

Todas las áreas metropolitanas estudiadas presentan dos picos de pérdidas de accesibilidad, uno en la hora punta de la mañana y otro en la tarde. La duración de cada uno de ellos es similar en todos los casos estudiados. Sin embargo, las ciudades de Londres y París, que siempre reportan las mayores pérdidas de accesibilidad incluso en el periodo entre picos, sufren los peores valores por la tarde, las ciudades alemanas muestran picos muy similares, y el resto muestran los peores resultados por la mañana. Las ciudades españolas apenas

pierden un 10% de accesibilidad por congestión en el peor pico. En este análisis se utilizó la población como variable para reflejar las oportunidades.

Las zonas más afectadas por la mañana se encuentran en la periferia de cada ciudad, avanzando los efectos de la reducción de fuera hacia dentro. Por la tarde todas las zonas reciben los efectos al mismo tiempo: los centros son los que reportan los peores valores de accesibilidad, pero la periferia también sufre considerablemente los efectos de la congestión. Las oportunidades dinámicas, en el caso de Madrid, tienen los mismos patrones temporales que los cambios de la red de transporte en la periferia, mientras que en las zonas centrales contrarresta los efectos de congestión. Las zonas intermedias, que sufren ambos picos con casi la misma intensidad, tienen un doble comportamiento, en un pico se comportan como las zonas centrales, en el otro como la periferia.

Los cambios en la red de transporte y en los flujos también alteran los valores de accesibilidad al empleo a lo largo del día. En el caso de los Países Bajos se ha observado que, entre 2011 y 2014, los cambios han favorecido a prácticamente todo el país en las horas punta, pero no así en el periodo entre picos de congestión. Sin embargo, las regiones próximas a Ámsterdam, con mayor inversión en esos años, son las que mayores beneficios reportan, incluso entre picos. Al considerar la nueva distribución de oportunidades, se ha observado como los efectos beneficiosos de los cambios de la red transporte solo se reportan en Ámsterdam y su entorno, donde precisamente aumentó el empleo mientras disminuía en el resto del país.

Los datos usados y los resultados obtenidos han sido presentados de diferentes maneras, tanto mediante cartografía estática como a partir del uso de diferentes animaciones. El uso de animaciones ha permitido presentar conjuntamente tanto la componente temporal como las componentes espaciales de la accesibilidad. En el caso de las cartografías estáticas se ha representado valores provenientes de los perfiles resultantes o de la agrupación de varios perfiles en categorías. En cualquier caso, se ha requerido representar varios valores para poder mostrar, parcialmente, ambas componentes.

Entender los efectos de la congestión desde el punto de vista de los cambios que produce en el potencial de interacción abre la puerta para entender cómo funciona una parte importante del sistema usos del suelo – transporte – sociedad, y las posibles reacciones que en él se producen cuando se realiza cualquier tipo de actuaciones en este sistema. De la misma manera, puede suponer mejoras en la planificación y actuación de las políticas coordinadas de ordenación del territorio y usos del suelo, al incorporar explícitamente la capacidad del

sistema de transportes, y valorar las consecuencias de una resiliencia excesiva o de unas pérdidas inadmisibles, tanto globalmente para cada área de estudio como a niveles más desagregados.

Abstract

Congestion in the road network is a phenomenon caused by a demand approximating or exceeding what is offered by the different elements forming the network at that instant. Traffic moves at speeds lower than free-flow situations, and thus, the time required to travel congested arcs increases. Congestion tends to bear characteristic patterns, depending on the type of roadway in question, both in terms of intensity and when it takes place. Additionally, congestion creates *spillover* effects, unequally deforming the city and affecting how one can interact with available opportunities.

The aim of this doctoral thesis is to evaluate and map how recurring roadway congestion, congestion taking place under normal circumstances, alters interaction potential values, also known as accessibility, when travelling by car over the course of the day for different highly-dense areas in the European Union, selected as areas of study: the metropolitan areas of Barcelona (ES), Berlin (DE), Hamburg (DE), London (GB), Milan (IT), Paris (FR) and Rome (IT), as well as the Netherlands (NL). Furthermore, for Madrid, we studied how the constant change in opportunities can mitigate or exacerbate the effects of congestion.

To carry out this research, a series of modifications were made to the potential accessibility indicator, providing for explicit incorporation of accessibility's time component. The data used to define the networks from observations made by the navigation company TomTom®, and Geographic Information Systems (GIS) tools, provided the average real time for each route, considering the speed at the moment when each route uses each arc. For dynamic opportunities, an approximation obtained by Twitter users' use of the city was utilised.

All metropolitan areas studied have two accessibility-loss peaks, one at rush hour in the morning, and the other in the evening. In all cases studied, each one of them has a similar duration. However, London and Paris, which always bear greater accessibility losses, even during the period between peaks, suffer the worst numbers in the evening. German cities show very similar peaks, and the rest have reduced accessibility in the morning. Spanish cities scarcely lose 10% accessibility due to congestion during the worst peak. In this analysis, the population was used as a variable to show opportunities.

The zones most affected in the morning are in each city's peripheral area, the reduction's effects moving from the outside inward. In the evening, all zones receive the effects at the

same time: city centres bear the worst accessibility values, yet the peripheral area also considerably suffers from the effects of congestion. In the case of Madrid, dynamic opportunities have the same time patterns as changes in the transport network in the peripheral area, while the effects of congestion are counteracted in the central areas. Intermediate zones, which suffer from both peaks with the same intensity, exhibit two-fold behaviour: during one peak, they behave like the central zones, and in the other, like the peripheral zone.

Changes in the transport network and in flows also alter accessibility to employment over the course of the day. In the Netherlands, it was observed that between 2011 and 2014, changes favoured practically the entire country during peak hours, while this was not the case in the period between congestion peaks. However, the regions near Amsterdam, with a greater investment during the aforementioned years, received the greatest benefits, even between peaks. In considering the new distribution of opportunities, it was observed that the beneficial effects of changes in the transport network were only in Amsterdam and its surroundings, where employment indeed increased, all while it decreased in the rest of the country.

The data used and the results obtained were presented in different ways, both through static mapping and based on the use of different animations. Animations allowed us to present both the time component and the spatial components of accessibility all together. The static mapping shows the values from the resulting profiles, or groups of several profiles in categories. In any event, it was necessary to represent several values in order to partially show both components.

Understanding the effects of congestion from the perspective of how it changes interaction potential opens the door to understanding how an important part of the land use - transport - society system operates, and the possible reactions that occur therein whenever any type of action is taken in this system. Furthermore, it can lead to improvements in planning and activating coordinated territory-planning and land-use policies, since it explicitly incorporates the transport system's capacity and assesses the consequences of excessive resilience or inadmissible losses, both globally for each area of study and at more disaggregated levels.

Agradecimientos

Hace no muchos años, no podía haber pensado que en estos momentos estaría poniendo el punto final a la tesis doctoral: ésta está lista para ser impresa. La ausencia de este pensamiento no es causa de creer que las investigaciones que se realizarían en el marco de esta investigación pudiesen alargarse en el tiempo, como ha sucedido, sino por qué no pensaba hacer doctorado ¡Qué cosas tiene la vida! Sin embargo, he realizado el programa de doctorado en un ámbito que siempre he disfrutado, el de la geografía, con un tema de tesis doctoral relacionado con el transporte y ordenación territorial, que además requería de plantear soluciones imaginativas con el ordenador para reducir el tiempo de cálculo. Un trabajo en el que he podido unir y ampliar los conocimientos académicos anteriores de ingeniería técnica de obras públicas y master en logística, transporte y movilidad, con otros relacionados con programación y, sobretodo, en geografía.

El resultado ha sido, a parte del presente documento, llegar a aquel destino que, sin tener ningún camino propio y directo en el sistema académico, siempre consideraba que era uno de los más llamativos para mí. Quizá siempre quise ser un “ingeniero del transporte geógrafo” o un “geógrafo técnico”, y considero que lo estoy consiguiendo a mi manera, llenándome de respuestas y reflexiones sobre mis inquietudes y curiosidades. Llegar a ese destino debía hacerlo de esta manera tan propia puesto a que de otra manera no hubiese ni siquiera haber partido, y, como ocurre en muchos viajes, son las rutas no establecidas las que te reportan las mejores experiencias.

Este camino no hubiese sido posible sin una buena guía, que entendiese esa necesidad de entremezclar conocimientos de campos del conocimiento diferentes. Es por ello que primero quiero agradecer a Juan Carlos García Palomares, mi director de tesis. No solo le debo agradecer el tiempo, esfuerzo y paciencia que ha dedicado en no desesperarse conmigo, pese a que no suelo ponerlo fácil y menos en este tipo de temas, sino también haberme dado la confianza y libertad de explorar todos los caminos que podían enriquecer este trabajo, sabiendo cortar a tiempo cuando el árbol no dejaba ver el bosque y guiándome en aprovechar oportunidades que iban surgiendo. ¡No hay ninguna reclamación posible a realizar!

Agradecer a Javier Gutiérrez Puebla, quien contestando a un correo en el que preguntaba por la temática del proyecto SPILLTRANS, allá por enero de 2012, y sin saberlo en aquel entonces, con su respuesta correcta pero directa -marca de la casa, me animó a solicitar la

plaza de becario FPI en dicho proyecto que desencadenó toda esta aventura. También agradecerle su trabajo director de tGIS, no solo su capacidad de haber reunido a un grupo excepcional en todos los aspectos, sino también por su increíble capacidad de guía y gestión, que permite que siempre tengamos las herramientas para hacer trabajos únicos.

El viaje del doctorado también requería tener muy buena compañía, y quien iba a decir que en dos salas que no se mueven por ni por Madrid ni por el mundo, como son “la Jaula” y “el Mirador”, encontraría el mejor medio de transporte para llegar a este destino. Los compañeros de viaje, Jaime Díaz, Estrella del Mar Tena, Henar Salas, Gustavo Romanillos, Claudia Yubero, Patricia García, Amparo Moyano, Gennaro Angiello, Joaquín Osorio, Carolina Barros, Julio Gómez y Harold Cardona ordenados por el momento que debieron apearse de dicho transporte o por el llegaron a este para aquellos que aún siguen en él, han sido imprescindibles en este camino. Cada uno haciendo nuestro viaje, pero viajando juntos.

En este viaje no olvidar a otros acompañantes que han visitado la Jaula por periodos cortos, de multitud de países, así como a otros que han estado en otras salas del edificio: Chema Fernández, Néstor Campos, Roberto Díez y Tatiana Coelho. De la misma manera han sido imprescindibles, pese a no tener etapa jaula/mirador conmigo, Obdulia Monteserín (gracias por aquel mes en tu casa recién comprada y con una decoración muy “curiosa”), Juan José Michelini, Ana Condeço, Inmaculada Mohino y Marcin Stępnia (que no por ser el último, es menos importante). Y como no, agradecer a Samuel Mattern el buen trabajo que siempre ha hecho revisando y/o traduciendo los textos al inglés.

Evidentemente también me gustaría agradecer a todos los miembros del entonces departamento de Geografía Humana y ahora departamento de Geografía que me ha permitido disponer de un espacio y atmosfera muy agradable de trabajo y en el que poder desarrollar esta tesis. Un departamento que me ha permitido ampliar mis herramientas para conocer el mundo, mediante una visión más “social” y “humanística” y que, sin significar que la comparta plenamente, me permite considerar mejor otros puntos de vistas menos técnicos o numéricos. Del mismo modo agradecerles la oportunidad que me dieron en poder dar docencia durante medio cuatrimestre en la asignatura de SIG I de grado y que fue una experiencia muy enriquecedora. También agradecer a Baltasar Fernández y Juan Pavón el haber contado conmigo para poder impartir unas horas de docencia en la asignatura de programación del máster.

Como no considerar en esta sección a todos los compañeros del proyecto SocialBigdata-CM,

que desde sus diferentes visiones me han permitido adquirir nuevos conocimientos para entender muchos aspectos de los cambios sociales a través del Big Data. Sin embargo, me gustaría hacer una especial mención a Guadalupe Miñana, Yolanda García y Jeff Almache por las horas dedicadas a preparar el clúster de ordenadores, a José Manuel Robles por acercarme al mundo de la sociología y a David Lois, intentando saber el uso de los términos canis y chonis mientras a mí me interesa más saber qué opina la gente de Cercanías Madrid.

En este apartado tampoco podían faltar todos los compañeros y amigos que han estado en mi etapa neerlandesa en Enschede en este doctorado. A Lissy C. LaPaix por haberme aguantado como compañero de casa en su casa durante ocho meses. ¿Cómo lo hiciste? A Karst T. Geurs por haber supervisado mis investigaciones en la Universidad de Twente y a quién aún le debo algunos artículos. A todos los compañeros de CTS, en especial a Mariska Van Essen, a John Pritchard y a Silvia Bernardi. Y fuera del entorno académico, agradecer a Nicholas Machado, a Rob Brink y a Rene Morteo, quienes me han mostrado los Países Bajos no académicos, tanto en castellano como en neerlandés.

Volviendo al entorno más cercano en mi vida en Madrid agradecer las horas, momentos, experiencias e historias vividas, mientras se hacia la tesis, junto a José Chávez, a Fung Shing Kuan, a Jubal Atencio, a Eli Rincón (aunque ahora su apellido es impronunciable), y a David Ortega. De la misma manera debo agradecer a todos los que, sin creérnoslo, hemos sido estrictos con nuestra cita semana al bádminton (aunque al cierre de este documento estemos en stand-by), como son Raúl, Miguel, Kiko (Adrián), Marta y Juanjo sois mi esperanza para cumplir la “Operación Bikini 2020”. También agradecer a William Freitas Mesquita, Rafael Rufino, Ballet Djédjé, Manuel Abad, Israel Paz, Tomás Salinas, Vyacheslav (Slavik) Del Toro, Alexis Mercado, Emmanuel Sánchez, Edwar Pabón, Francis Núñez, Igor Mayor, Jonathan Pelegrín... el haber estado ahí y hacerme avanzar en la tesis.

Como no agradecer el apoyo para la realización de esta tesis a los “Paco’s Friends”. A María Casado, quien desde antes de nacer siempre ha estado muy cerca de mí. A Miguel Ángel López-Zuazo, a quien con solo un hola ya tiene motivo para venir a Madrid (algún día sabremos que le atrae tanto a esta ciudad). A Lidia Pedro, que pese está dando vueltas a mundo, siempre tiene tiempo para estar ahí cuando la necesitas, o cuando quieres hacer una escapada a Berlín :p. A Vero Cervera y Carlos Allendes, lectores profesionales del grupo de whatsapp, y opinadores puntual, pero que siempre están ahí. Y como no a Cristian Lorente, padre de Paco, que ha sabido quedarse con lo mejor de Cunit (una gran responsabilidad).

Tampoco olvidar a los amigos de mis anteriores etapas de la educación superior. A los “Buscapeligrus” Mónica Rovira, Ana Medina y Sergio Padilla (aunque ya veía del instituto). A Carlos García, que es un Buscapeligrus-OMVOOP y quien no se pudo resistir a que le animase a hacer el máster que aún tiene pendiente finalizar. Y como no a los amigos hechos en el máster, en especial a Marga Transmontano, a Manuel Bullejos y a Lidia Montero

Aunque es uno de los últimos bloques a los que quiero agradecer esta tesis, es quizá una de los más determinantes: a todos los que, en cierta manera, son mi familia. A mi madre Pilar, a mi padre Pepe, a mi hermano Ionai (Topo) y a Carla, a mis abuelas Josefina y Epifania, a mis tíos Joaquín, Kiki, Paco, y Conce, así como a todos mis primos y parejas conocidas Adrián, Andrea I., Laura, Javier, José, Conchi y Juan, y sin olvidarme de tus sus parejas hijos/as, aunque alguno sabe qué quien se me pierde una vez, puede volver a perderse de otra manera. Tampoco olvidar de agradecer el apoyo de Xus, de Elena y José Manuel, de Gonzalo, Melani y Paula, y de Jaume Casañas (quien acabo animándome a entrar en la rama de la geografía y quien sigue con una tesis que no acaba... será que tiene muchas ocupaciones), Carme Vera, Agustí Bernabé...

Finalmente, agradecer a las entidades que han financiado el que pueda realizar este doctorado: el Ministerio de Economía y Competitividad la financiación de este trabajo dentro del proyecto SPILLTRANS (TRA2011-27095) y del que fui becario/contratado FPI y por la financiación de las dos estancias breves realizadas en Enschede (Países Bajos). Agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) por la financiación del proyecto DynAccess (TRA2015-65283-R). Finalmente, también agradecer a la Comunidad de Madrid la financiación de la red de investigación SocialBigdata-CM (H2015/HUM-3427).

En esta sección, seguramente me he dejado a muchas personas que deberían aparecer en este listado porque alguna aportación importante para que pudiese acabar esta tesis doctoral. A todos ellos, tened presente que estáis incluidos en esta sección de todas formas. ¡Muchas gracias a todos!

Índice

Resumen.....	5
Abstract	9
Agradecimientos.....	11
Índice.....	15
Lista de tablas	21
Lista de figuras	23
Lista de símbolos	27
Lista de abreviaturas	33
1.1. Introducción.....	37
1.2. Preguntas de investigación, objetivos y estructura de la tesis.....	47
1.2.1. Preguntas de investigación	47
1.2.2. Objetivo principal.....	50
1.2.3. Objetivos específicos	51
1.2.4. Estructura de la tesis.....	56
1.3. Marco teórico y estado del arte	63
1.3.1. La accesibilidad	63
1.3.1.1. Las cuatro componentes de la accesibilidad	64
1.3.1.2. Las medidas de la accesibilidad	68
1.3.1.3. Accesibilidad y movilidad. Dos conceptos relacionados	79
1.3.1.4. La probabilidad de interacción: la importancia de la <i>función de disuasión según impedancia</i>	84
1.3.2. La componente del transporte en carreteras: el tráfico y la congestión.....	88

1.3.2.1.	Modelos de tráfico	89
1.3.2.2.	Modelos de asignación de flujos.....	97
1.3.3.	El reto del estudio de la accesibilidad en entornos dinámicos.	100
1.3.4.	Otras consideraciones a tener en cuenta en la evaluación de los resultados: el escenario de referencia.	108
1.4.	Metodología, bases de datos y especificaciones de cálculo.	111
1.4.1.	Metodología: el indicador de accesibilidad.....	111
1.4.2.	Las bases de datos usadas y tratamiento de datos	112
1.4.2.1.	Bases de datos de la componente <i>transporte</i>	113
1.4.2.2.	Bases de datos de la componente <i>usos del suelo</i>	124
1.4.2.3.	Bases de datos de la componente <i>individual</i>	130
1.4.3.	Especificaciones de cálculo	133
1.4.3.1.	Estudios de los efectos directos de la congestión en entornos metropolitanos 136	
1.4.3.2.	Estudio de los efectos de los cambios de las componentes en la accesibilidad y evolución de la congestión	138
1.4.3.3.	Estudio de los efectos de los cambios de las componentes en la accesibilidad y la congestión	141
2.	Papers	145
	Paper 1: Working with the daily variation in infrastructure performance on territorial accessibility. The cases of Madrid and Barcelona	147
	Abstract.....	147
	1. Introduction	148
	2. From static to dynamic accessibility. Some approaches	150
	3. Estimation of dynamic territorial accessibility. Testing in Madrid and Barcelona	155

4. Results	159
5. Conclusions and future research.....	165
6. Acknowledgments.....	167
7. References.....	167
8. Supplemental material	172
Paper 2: The daily dynamic potential accessibility by car in London on Wednesdays	173
Abstract.....	173
1. Introduction.....	173
2. Old techniques in new maps.....	175
3. Methodology	177
4. Construction of the main map.....	180
5. Conclusions and future research	184
6. Software	186
Acknowledgments.....	186
References.....	186
Supplemental material	190
Main Map (<i>following two pages</i>).....	191
Paper 3: The impacts of congestion on automobile accessibility. What happens in large European cities?	195
Abstract.....	195
1. Introduction.....	195
2. Methodology	199
3. The study areas. Eight European cities	202
4. What effect does congest have on the automobile accessibility of European cities?	

207	
5. Conclusions.....	217
Acknowledgements.....	220
Bibliography	220
Paper 4: The spatial–temporal dynamics in job accessibility by car in the Netherlands during the crisis: Impacts of infrastructure investments, congestion, and the spatial developments for 2009-2014.	
	227
Abstract.....	227
1. Introduction.....	227
2. The Netherlands between 2009 and 2014.....	229
3. Methodology for comparing dynamic daily accessibility patterns.....	232
4. The data	235
5. The impact of changes on job distribution and/or transport on job accessibility developments	237
6. Conclusions and discussion	248
Acknowledgments.....	249
References	249
Appendix 1. Methodology for determination of the dominant change.....	253
Paper 5: Dynamic accessibility using big data: The role of the changing conditions of network congestion and destination attractiveness	
	255
Abstract.....	255
1. Introduction.....	255
2. Study context.....	260
3. Data description and data pre-processing	260
4. Methods.....	263

5. Results.....	265
6. Conclusions	273
Acknowledgments.....	275
References.....	275
Supplemental material	280
3. Conclusions	283
3.1. Responses related to the research questions.....	283
3.2. Final conclusions	297
3.3. Future lines of research	298
3. Conclusiones	301
3.1. Respuestas relacionadas con las preguntas de investigación.....	301
3.2. Conclusiones finales.....	316
3.3. Futuras líneas de investigación	318
Bibliografía	323
Anexo A. <i>Fichas de las áreas de estudio</i>	353
Londres (LON) - GB.....	356
París (PAR) - FR.....	358
Madrid (MAD) - ES.....	360
Berlín (BER) - DE.....	362
Barcelona (BCN) - ES.....	364
Roma (ROM) - IT	366
Hamburgo (HAM) - DE.....	368
Milán (MIL) - IT.....	370

Ciudades principales Randstad 2011 - NL.....	372
Ciudades principales Randstad 2014 - NL.....	374
Países Bajos 2011 - NL	376
Países Bajos 2014 - NL	378
Anexo B. <i>Módulos</i>	381
B.1. Módulos para el cálculo y valoración de resultados	381
B.1.1. Cálculo de las impedancias para cada momento de salida en origen	381
B.1.2. Cálculo de las impedancias para cada momento de llegada a destino.....	385
B.1.3. Comprobación de consistencia de las impedancias	386
B.1.4. Estimación de los parámetros de la <i>función de disuasión según impedancia</i> ...	387
B.1.5. Obtención del valor de accesibilidad.....	389
B.2. Herramientas de análisis de los resultados	390
B.2.1. Generación de valores globales, perfiles normalizados y valores estadísticos generales	390
B.2.2. Asignación de perfiles según categorías	393
B.2.3. Generación de animaciones	393
Bibliografía Anexo B	394
Anexo C. <i>Funciones de disuasión según impedancia</i>	395
Bibliografía Anexo C	396
Anexo D. <i>Niveles de servicio</i>	397
Bibliografía Anexo D	398
Anexo E. <i>Congresos y seminarios en los que se ha expuesto material de la tesis doctoral</i>	399
Anexo F. <i>Primera y última página de los artículos publicados</i>	401

Lista de tablas

BLOQUE 1 | SECTION 1

- Tabla 1.1 Definición de las principales familias de *función de disuasión según impedancia*.
- Tabla 1.2 Otras *funciones de disuasión según impedancia* (véase también Anexo C).
- Tabla 1.3 Algunas de las funciones velocidad-densidad definidas para el estudio del tráfico.
- Tabla 1.4 Cronograma de la captación de datos de velocidades para cada país realizada por TomTom (C = Captación, E = Entrega y geografía de la red según MultiNet®).
- Tabla 1.5 Asignación de cada arco a jerarquía de Network Dataset.
- Tabla 1.6 Parámetros y valor AIC de las diferentes *funciones de disuasión según impedancia* estudiadas para los datos del OVIN 2010.
- Tabla 1.7 Condiciones usadas para el cálculo de las rutas y su grado de prohibición.

BLOQUE 2 | SECTION 2

Paper 1

- Table 1 Summary of calculation time for the study areas.

Paper 2

- Table 1 Time cartogram construction process.
- Table 2 Relative time-distorted area

Paper 3

- Table 1 General information on the study areas. Car share data source (UN HABITAT, 2013). Motorway length is obtained from TomTom® data (see section 3.3).
- Table 2 Main global speed [km/h] results.
- Table 3 Main global accessibility [potential units] results.
- Table 4 Accessibility behaviour and values during free flow time and peaks. (* Use this value to read row 1 in Figures 5a and 5b).

Paper 4

- Table 1 Summary of 2011 and 2014 version of TomTom® data.

Paper 5

- Table 1 Geolocated tweets in the Region of Madrid, main figures.
- Table 2 Descriptive statistics of accessibility in the reference scenario.

Table 3 Descriptive statistics of accessibility in the dynamic scenarios.

ANEXOS | ANNEXES

Anexo A

Tabla A.1 Ranking de las áreas de estudio según su dotación de autopistas y otras carreteras primarias (FRC 0) y carreteras primarias con características inferiores a autopista (FRC 1) para cada 1.000 habitantes y para km².
Fuente: TomTom©

Tabla A.2 Cronograma de la captación de datos de velocidades mostradas en cada ficha del anexo A (C = Captación, E = Entrega y geografía de la red según MultiNet®).

Anexo C

Tabla C.1 Funciones de disuasión según impedancias. Fuentes: Geurs y Van Wee (2001), Reggiani, Bucci y Russo (2011a) y Shrewsbury (2012).

Anexo D

Tabla D.1 Definición de los diferentes niveles de servicio para autopistas y calles urbanas según el Highway Capacity Manual 2000 (TRB, 2000).

Lista de figuras

BLOQUE 1 | SECTION 1

- Figura 1.1 Evolución tasa de coches por cada 1.000 habitantes para los 5 países europeos. Base 100 = valor del año 1990 – Entre paréntesis, coches por cada 1.000 habitantes en 1990. Fuente: Eurostat (2017c).
- Figura 1.2 Porcentaje de población en puesto de trabajo o estudio a lo largo de un día. Fuente: Eurostat (2009).
- Figura 1.3 Tiempo de viaje medio de cada ciudad en flujo libre y en congestión para 2016 según TomTom Traffic Index. Los números de en las columnas son los minutos extras de viaje debido a la congestión.
- Figura 1.4 Evolución del % de incremento de minutos de viaje debido a la congestión con respecto al valor medio de viaje en flujo libre según TomTom Traffic Index. Fuente: TomTom (2017).
- Figura 1.5 Coste de la congestión en 2025 según INRIX para los términos municipales de las ciudades de los casos de estudio y Ámsterdam (Países Bajos). Valor en millones de Euros. Los nombres de las ciudades usan los códigos IATA (2014). Fuente: Cookson (2016).
- Figura 1.6 Relación de cada Objetivo Especifico (O.E.) con cada pregunta de investigación (P.I.) y con cada artículo (Art.). El grosor de línea solo se usa para garantizar que el flujo ocupa todo el lado del nodo intermedio.
- Figura 1.7 Esquema de los prismas espacio-temporales. Fuente: Neutens, Schwanen, y Witlox (2011).
- Figura 1.8 Distancia mínima para poder desacelerar según diferencial de velocidades entre la velocidad inicial y la final y el parámetro de desaceleración.
- Figura 1.9 Diagrama de trayectorias para un tramo de carretera concreto.
- Figura 1.10 En el eje izquierdo, diagrama densidad – flujo. En el eje derecho, diagrama densidad – velocidad. Obsérvese como los puntos de la misma línea vertical muestran los 3 valores del tráfico.
- Figura 1.11 Rutas según el modelo de valoración de las redes. Fuente: Moya-Gómez, B. y García-Palomares, J.C. (2015).
- Figura 1.12 Ejemplo de perfiles de velocidad. En el ejemplo los perfiles 40, 41 y 42 de la versión 1 de HSP.
- Figura 1.13 Evolución temporal del total de usuarios de Twitter en activo el área

metropolitana de Madrid cada 15 minutos.

Figura 1.14 Las tres *funciones de disuasión según impedancia* usadas en esta tesis.

BLOQUE 2 | SECTION 2

Paper 1

- Figure 1 Example of the differences between the shortest route estimated by static methods and by dynamic methods.
- Figure 2 Transport network, study areas, areas of calculation (with cell and population) and population distribution in 2006.
- Figure 3 Temporal evolution of the global and relative accessibility value.
- Figure 4 Comparing accessibilities at different times of day.
- Figure 5 Potential accessibility behaviour patterns.
- Figure 6 *Time with lowest MPUs.*

Paper 2

- Figure 1 The metropolitan area of London.
- Figure 2 Kilometers of UK road network by category. The back bars are km with speed profiles (showing percentage).
- Figure 3 Travel time from Downtown in Free Flow Speed scenario (21:30 – 02:15) (left: geographic map; right: time cartogram).
- Figure 4 How congestion distorts London from Downtown.
- Figure 5 Accessibility in London on Wednesdays.

Main Map Main Map of Paper (2 pages)

Paper 3

- Figure 1 Spatial distribution of population in study areas and area of calculation (2x2km cells).
- Figure 2 Accumulate population and net population density from each city centre.
- Figure 3 Some TomTom®'s Speed Profiles for Wednesdays in A13 and A15 at 12km from Main City border (Paris).
- Figure 4 Daily evolution of average accessibility potential (in potential units and %).
- Figure 5a Accessibility during Wednesdays in London, Paris, Madrid and Berlin.
- Figure 5b Accessibility during Wednesdays in Barcelona, Rome, Hamburg and Milan.
- Figure 6 The worst hour and classification of each zone according to the similarity of their relative profiles to the global cities' relative profiles (Figure 4).
- Figure 7 Worst accessibility peak from downtown.

Paper 4

- Figure 1 Population and Job position density distribution in 2009 and relative changes to 2014. Low-density municipalities have less than, or equal to 100 item/km².
- Figure 2 Changes in Dutch major road network between 2011 and 2014. Sources: TomTom® and Dutch Government.
- Figure 3 Spatial distribution of job accessibility in 2009 [impedance-weighted jobs].
- Figure 4 Spatial distribution of relative effects of job distribution changes in job accessibility values (Eq. 3a). Base 2009 = 1.
- Figure 5 Spatial distribution of relative effects of transport changes in job accessibility values (Eq. 3b). Base 2009 = 1.
- Figure 6 Spatial distribution of relative combined effects of jobs and job changes in job-accessibility values. (Eq. 3c). Base 2009 = 1.
- Figure 7 Spatial distribution of most determinant change and effects.
- Figure A1.1 Relative effects of job positions and/or transport changes in job accessibility values throughout the A1 and A2 motorways for Thursday. Base 2009 = 1.
- Figure A1.2 The scatter plot for categorising municipalities according to the main effect of changes and the dominant change. 8 sectors are created using axis and 45° lines. Point colour is the result of combined effect (showed in Figure 6).

Paper 5

- Figure 1 Number of active tweeters throughout the day in the metropolitan area of Madrid.
- Figure 2 Changes in average accessibility every 15 mins according to scenarios.
- Figure 3 Profile for changes in accessibility according to scenarios (every 15 mins) in three representative transport zones in the metropolitan area of Madrid.
- Figure 4 Spatial distribution of accessibility in the reference scenario (network congestion and destination attractiveness remain static).
- Figure 5 Differences between the dynamic scenarios and the reference scenario.
- Figure 6 Coefficient of variation in accessibility distribution profiles (every 15 minutes) according to transport zones and scenarios.

ANEXOS | ANNEXES

Anexo B

- Figura B.1. Diagrama de flujos de la herramienta construida en ModelBuilder para el cálculo de tiempos de viaje para cada momento de salida en origen.

Lista de símbolos¹

a	vector de accesibilidad.
a_i	valor de la accesibilidad para la zona i -ésima.
a_j^{pas}	valor de la accesibilidad pasiva para la zona j -ésima.
a_i^{dtvat}	valor de la accesibilidad para la zona i -ésima saliendo de origen a una determinada hora (dt) o llegando a destino a una determinada hora (at).
a_r	valor de la accesibilidad del individuo r -ésimo.
b_η	valor entre 0 y 1 que corresponde al η -ésimo bloque entre dos límites de impedancias en la <i>función de disuasión según impedancia</i> de tipo empírica.
c_{arc}^{stvat}	valor de la impedancia del arco arc -ésimo valorado en el momento de iniciar el viaje en la zona i -ésima (dt) o de finalizarlo en la zona j -ésima (at). Depende del criterio de cálculo.
c_{arc}^m	valor de la impedancia del arco arc -ésimo valorado en el momento m -ésimo.
\bar{c}_i^{dt}	valor medio de las impedancias desde la zona i -ésima ponderadas por el peso de todas las zonas j -ésimas tomadas desde la hora de salida (dt).
\dot{c}_{ii}	valor de la impedancia interna de la zona i -ésima.
\dot{c}_{ij}	valor de la impedancia de la parte interzonal de la relación de la zona i -ésima a la zona j -ésima.
c_{ij}	valor de la impedancia total para ir de la zona i -ésima a la zona j -ésima.
\dot{c}_{jj}	valor de la impedancia interna de la zona j -ésima.
\bar{c}_s	valor medio de la impedancia en el grupo s -ésimo.
c_{ij}^{dtvat}	valor de la impedancia total para ir de la zona i -ésima a la zona j -ésima, habiendo salido de la zona i -ésima a una determinada hora (dt) o habiendo llegado a la zona j -ésima a una determinada hora (at). Esta depende del criterio de cálculo.

¹ La nomenclatura de las variables es la misma a lo largo de los bloques 1 y 3 de este documento, pudiendo ser diferentes en cada artículo del bloque 2 según los diferentes requerimientos realizados en los procesos de revisión anónima. Se ha intentado mantener, en la medida de lo posible, los símbolos más habituales en la literatura para cada variable. Obsérvese como existe diferenciación entre mayúsculas y minúsculas, pudiendo no existir correspondencia entre ellas.

c_s^{inf}	valor mínimo de la impedancia que define al grupo s -ésimo.
c_s^{sup}	valor máximo de la impedancia que define al grupo s -ésimo.
cte	valor constante de población para todos los periodos temporales.
d_j	valor de las oportunidades en la zona j -ésima.
d_j^{atr}	valor de las oportunidades en la zona j -ésima a una determinada hora. Se asocia a la hora de llegadas de cada una de las rutas (atr).
$dist_{ij}^{dtvat}$	valor de la distancia recorrida para ir de la zona i -ésima a la zona j -ésima, habiendo salido de la zona i -ésima a una determinada hora (dt) o habiendo llegado a la zona j -ésima a una determinada hora (at), por el camino de menor tiempo de viaje.
$f(c_{ij}, \theta)$	componente función que corresponde a la función que pondera la posibilidad de interacción o conteo de oportunidades según la impedancia para ir de la zona i -ésima a la zona j -ésima.
$f^{dtvat}(c_{ij}^{dtvat}, \theta^{dtvat})$	componente función que corresponde a la función que pondera la posibilidad de interacción o conteo de oportunidades según la impedancia para ir de la zona i -ésima a la zona j -ésima, según si está se considera a partir de la hora de salida de la zona i -ésima (dt) o si se considera a partir de la hora de llegada a la zona j -ésima (at). Los parámetros y la propia definición puede variar según el tiempo de salida o de llegada.
$g(\dots)$	representación de cualquier función para calcular la accesibilidad.
$h(c_{ij})$	función del coste del transporte de cada estado <i>meso</i> .
$intervalo_n$	tiempo que ha tardado en pasar el vehículo n -ésimo con respecto al vehículo que precede por un punto determinado de la carretera en estudio.
k	densidad del tráfico.
k_{jam}	densidad máxima del tráfico.
$l(\dots)$	función que relaciona el incremento del tiempo de recorrer el arco de la red según su capacidad y el flujo previsto.
$longArco$	longitud arco de la red en estudio.
o_i	valor de la zona i -ésima.
p_{xrl}	variable del subconjunto de variables genéricas X del individuo r -ésimo y la alternativa l -ésima.

p_{yrl}	variable del subconjunto de variables específicas de alternativas Y del individuo r -ésimo y la alternativa l -ésima.
p_{zr}	variable del subconjunto de variables específicas de individuo Z del individuo r -ésimo.
q	flujo de tráfico.
q_{max}	capacidad de la vía. También es el flujo máximo de tráfico.
$rutas_{ij}$	conjunto de rutas que une la zona origen i -ésima con la zona destino j -ésima.
t	tiempo entre la situación inicial y la calculada, en MRUA.
$tiempo$	tiempo total de observación.
$tiempRecor_{arc}(q)$	tiempo necesario para recorrer el arco según el flujo que solicita usar el arco arc -ésimo.
$tiempRecor_{arc}(0)$	tiempo necesario para recorrer el arco arc -ésimo a velocidad de flujo libre, o equivalente a sin tráfico.
$tiempRecor_n$	tiempo que ha tardado el vehículo n -ésimo en recorrer la longitud arco de la red en estudio ($longArco$).
u	velocidad del frente de choque provocado por un cambio de estado del tráfico.
$users_j^y$	valor de usuarios de la zona j -ésima para el periodo y -ésimo.
\overline{users}_j^t	valor de la media móvil centrada de usuarios de la zona j -ésima para el periodo de tiempo t -ésimo.
$\overline{\overline{users}}_j^t$	valor normalizado de la media móvil de usuarios de la zona j -ésima para el periodo de tiempo t -ésimo.
$v(k)$	velocidad, como función de la densidad.
v_f	velocidad de flujo libre.
v_{med}^P	velocidad mediana para un periodo P .
v_n	velocidad del vehículo n -ésimo.
v_s	velocidad espacial (<i>space-speed</i>) en un arco de la red.
v_t	velocidad temporal (<i>time-speed</i>).
\bar{v}^P	es velocidad media observada ponderadas por el peso de la zona origen i -ésima y de la zona destino j -ésima para un periodo P .
x	posición del móvil transcurrido t , en MRUA.
x_o	posición inicial del móvil, en MRUA.
x'	velocidad transcurrido t , en MRUA.

- x'_0 velocidad inicial del móvil, en MRUA.
 x'' aceleración del móvil, en MRUA.
 A_i coeficiente balanceador de la zona i -ésima.
 A_i^w coeficiente balanceador de la zona i -ésima para la iteración w -ésima.
 B_j coeficiente balanceador de la zona j -ésima.
 B_j^w coeficiente balanceador de la zona j -ésima para la iteración w -ésima.
 C coste total del sistema de transportes.
 D_j total de viajes que atrae la zona j -ésima.
 F conjunto de arcos de la red.
 L conjunto de alternativas.
 M conjunto de posibles tiempos de uso de cualquier arco de la red.
 N conjunto de zonas dentro de la zona de estudio.
 O_i total de viajes que se generan en la zona i -ésima.
 P conjunto de periodos de estudio.
 R conjunto de individuos en estudio.
 S conjunto de grupos predefinidos de impedancia en la calibración empírica-tripproporcional.
 T total del volumen de viajes en el área de estudio.
 T_{ij} volumen de viajes entre la zona i -ésima y la zona j -ésima.
 T_{ij}^r volumen de viajes entre la zona i -ésima y la zona j -ésima que usa la ruta r -ésima.
 X subconjunto de variables genéricas para el cálculo de la utilidad.
 Y subconjunto de variables específicas de alternativa para el cálculo de la utilidad.
 W número de estados *micro* asociados a un estado *meso*.
 Z subconjunto de variables específicas de individuo para el cálculo de la utilidad.
 α_l constante de la alternativa l -ésima.
 β_x parámetro de sensibilidad asociado a la variable genérica x -ésima del subconjunto X .
 γ_{zl} parámetro de sensibilidad asociado a la variable específica de individuo z -ésima del subconjunto Z de la alternativa l -ésima.

- δ_{yl} parámetro de sensibilidad asociado a la variable específica de alternativa y -ésima del subconjunto Y de la alternativa l -ésima.
- ε término aleatorio que hacer referencia a la parte no sistemática de la utilidad.
- ζ_s coeficiente balanceador del grupo de impedancias s -ésimo en la calibración empírica-triproporcional.
- ζ_s^w coeficiente balanceador del grupo de impedancias s -ésimo en la calibración empírica-triproporcional para la iteración w -ésima.
- η_{ult} es el último bloque con valor $b_z > 0$ de la *función de disuasión según impedancia* de tipo empírica.
- v_{rl} parte determinista de la utilidad del r -ésimo en realizar la actividad l -ésima.
- θ conjunto de parámetros que definen la función que pondera la posibilidad de interacción o conteo de oportunidades.
- θ^{dtvat} es el conjunto de parámetros que definen la función que pondera la posibilidad de interacción o conteo de oportunidades que puede variar según si se establece según hora de salida (dt) u hora de llegada (at).
- σ_s^2 varianza de la velocidad espacial de un arco de la red.
- τ incremento o decremento del tiempo que define los límites superior e inferior del intervalo a considerar para el cálculo de la media móvil centrada.
- v_{rl} utilidad que obtiene el individuo r -ésimo en realizar la actividad l -ésima.
- $\varphi_{ijr(arc)}$ variable binaria que indica si el arco arc -ésimo es usado por la ruta. r -ésima de la relación entre la zona origen i -ésima y la zona destino j -ésima.
- $\varphi_{ij(arc)}^{stvat}$ variable binaria que expresa si la ruta entre la zona i -ésima y la zona j -ésima y valorada según su hora de salida (dt) u hora de llegada (at) utiliza el arco arc -ésimo.
- $\varphi_{ij(arc)}^{(stvat)m}$ variable binaria que expresa si la ruta entre la zona i -ésima y la zona j -ésima según su hora de salida (dt) u hora de llegada (at) utiliza el arco arc -ésimo en el momento m -ésimo.
- κ conjunto de parámetros que definen la función VDF.

- $[t - \tau, t + \tau]$ intervalo en el que se encuentran los valores de la media móvil.
- $|[t - \tau, t + \tau]|$ número de valores a considerar.
- $|veh|$ número total de vehículos.

Lista de abreviaturas

AIC	<i>Akaike Information Criteria</i> . Criterio de Información de Akaike.
AMS	Ámsterdam. Países Bajos (IATA, 2014).
BCN	Barcelona. España (IATA, 2014).
BER	Berlín. Alemania (IATA, 2014).
CBS	<i>Centraal Bureau voor Statistiek</i> . Oficina Central de Estadística (Países Bajos).
CRTM	Consortio Regional de Transportes de Madrid.
DE	Alemania. (International Organization for Standardization, n.d.).
EDM	Encuesta Domiciliaria de Movilidad.
EMO	Estudio de Movilidad Obligada.
ES	España. (International Organization for Standardization, n.d.).
ESPON	<i>European Observation Network for Territorial Development and Cohesion</i> . Red Europea de Observación para el Desarrollo Territorial y la Cohesión.
EU	Unión Europea. (International Organization for Standardization, n.d.).
FFS	<i>Free Flow Speed</i> . Velocidad en flujo libre.
FIFO	<i>First In First Out</i> . El primero que entra es el primero que sale.
FR	Francia. (International Organization for Standardization, n.d.).
FUA	<i>Functiona Urban Area</i> . Área urbana funcional (ESPON, 2014a).
GB	Reino Unido de la Gran Bretaña e Irlanda del Norte. (International Organization for Standardization, n.d.).
GTFS	<i>General Transit Feed Specification</i> . Especificación general de feeds de transporte público (Google, 2016).
HAM	Hamburgo. Alemania (IATA, 2014).
HSNP	<i>Network Profile Link Table</i> . Tabla de unión de perfiles de velocidad a arcos de la red. Parte del producto Historical Speed Profiles®.
HSP	<i>Historial Speed Profiles®</i> . Perfiles históricos de velocidad.
HSPR	<i>Historical Speed Profiles</i> . Tabla de definición de perfiles de velocidad. Parte del producto Historical Speed Profiles®.
HETUS	<i>Harmonised European time use surveys</i> . Encuestas europeas armonizadas de uso del tiempo.
IATA	<i>International Air Transport Association</i> . Asociación Internacional del Transporte Aéreo.
INE	Instituto Nacional de Estadística (España).

- IT Italia. (International Organization for Standardization, n.d.).
- LAU *Local Administrative Unit*. Unidad Administrativa Local (Eurostat, 2011).
- LISA *Landelijk Informatiesysteem van Arbeidsplaatsen*. Sistema de información nacional de puestos de trabajo.
- LON Londres. Reino Unido de la Gran Bretaña e Irlanda del Norte (IATA, 2014).
- LOS *Level of Service*. Nivel de servicio (TRB, 2000).
- LUZ *Large Urban Zones*. Grandes Áreas Urbanas (ESPON, 2014a).
- LWR Modelo Lighthill, Whitham (1955) y Richards (1956). Modelo continuo del tráfico.
- MAD Madrid. España (IATA, 2014).
- MAUP *Modifiable Areal Unit Problem*. Problema de la Unidad Espacial Modificable.
- MIL Milán. Italia (IATA, 2014).
- MN *Maneuvers, Geometry and basic attributes*. *Feature Class* de la geometría de las maniobras. Parte del producto MultiNet®.
- MP *Maneuver Path Index*. Tabla de otros datos de las maniobras.
- MPU *Market Potential Units*. Unidades de potencial de mercado. Es unidad como se conoce al resultado de las medidas de accesibilidad potencial en los estudios de accesibilidad a mercados.
- MRUA Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado.
- NL Países Bajos. (International Organization for Standardization, n.d.).
- NUTS *Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques*. Nomenclatura de las Unidades Territoriales Estadísticas (ESPON, 2014b).
- NW *Network, Geometry with Basic Attributes*. *Feature Class* de la geometría de la red de carreteras. Parte del producto MultiNet®.
- OD Origen-Destino.
- OSM *Open Street Map*.
- OTM *Open Transport Map*.
- OViN *Onderzoek Verplaatsingen in Nederland*. Estudio de desplazamientos en los Países Bajos.
- PAR París. Francia (IATA, 2014).
- PC4 *PostCode 4 cijfers*. Código postal de 4 cifras.
- PIB Producto Interior Bruto.
- PPA *Potential Path Area* (Lenntorp, 1976). Área de caminos potenciales.
- ROM Roma. Italia (IATA, 2014).
- SBI08 *Standaard Bedrijfsindeling 2008*. Código estándar de empleo 2008. (Statistics

Netherlands, n.d.).

- SI *Signpost Information*. Tabla de señales de información. Parte del producto MultiNet®.
- SIG Sistemas de Información Geográfica. También conocido por sus siglas en inglés (*GIS – Geographical Information System*).
- SP *Singpost Path Index*. Tablas rutas siguiendo señales informativas. Parte del producto MultiNet®.
- STP *Spatial-Time Prism* (Hägerstrand, 1970). Prisma espacio-temporal.

BLOQUE 1 | *SECTION 1*

Introducción, preguntas de investigación, marco teórico
y estado del arte, metodología y bases de datos

1.1. Introducción

Las sociedades humanas, de la misma manera que otros sistemas naturales y artificiales que pueden considerarse como sistemas complejos, se definen fuertemente por la calidad, la cantidad, la intensidad y la variedad de las relaciones que sus miembros son capaces de establecer entre ellos y con el entorno que les rodea, generando también dependencias, riesgos y sinergias.

Estos sistemas se caracterizan por el conjunto total de relaciones posibles que se pueden/podrían haber establecido y que no se han realizado por la elección de otra alternativa. La creación, cambio de condiciones o existencia de otras relaciones, así como la amenaza de anomalía o no posibilidad de continuidad de las relaciones ya establecidas puede inducir a elegir otras opciones que pueden desencadenar otros cambios derivados en relaciones complementarias y sustitutivas, y en las sinergias y dependencias existentes.

Gran parte de las relaciones de las sociedades humanas, especialmente las que definen el día a día de cada miembro, se suelen caracterizar por deber realizarse en tiempos y lugares diferenciados, y con ventanas temporales de realización que condicionan el posible grado de adecuada satisfacción de la participación en las actividades de cada relación. Del mismo modo, es un condicionante la posibilidad de concatenar adecuadamente dichas actividades con las de posibles relaciones posteriores en el tiempo (Primerano, Taylor, Pitaksringkarn, & Tisato, 2008; Thill & Thomas, 1987; Timmermans et al., 2003)

La participación en las actividades de una relación puede suponer la necesidad de realizar desplazamientos físicos que se consideran habituales e/o incuestionables, sobre todo en las sociedades humanas llamadas industrializadas. La consideración de actividad normal a la necesidad desplazarse para poder realizar casi cada relación es uno de los principales productos de las acciones y evoluciones de las componentes conocidas como usos del suelo y transportes. La influencia de estas componentes sobre el conjunto de relaciones posibles y relaciones realizadas no es posible determinar sin conocer sus tendencias, y cómo también se han influenciado y condicionado mutuamente entre ellas mismas.

Las ampliaciones y mejoras de prestaciones en las redes, medios y servicios de transporte no sólo han permitido llegar a nuevos lugares sino también “acercar²” aquellos que se

² Una de las medidas de cálculo de distancias a nivel humano entre dos lugares es el tiempo. Este valor es proporcionalmente dependiente de una

percibían separados o superar barreras relativas o absolutas que condicionaban o dificultaban el acceso a algunos destinos. Del mismo modo, también se han permitido dotar a la actividad de desplazarse de un cierto marco de disponibilidad, fiabilidad y con un coste relativamente bajo que, salvo excepciones relacionadas con sucesos raros e infrecuentes, hace que se perciba como una actividad con gran tasa de éxito; es decir, prácticamente la totalidad de los viajes realizados se hacen dentro de los tiempos y condiciones previstas.

Por su parte, la ordenación del territorio ha podido orientarse hacia la agrupación (clusterización) de actividades compatibles y complementarias, fuerzas centrípetas, a la vez que impide la presencia cercana de tipos de actividades definidas como incompatibles y las aleja entre sí, fuerzas centrifugas (D. Levinson, Marion, Owen, & Cui, 2017). Estas tendencias son posibles, en gran medida, debido a las posibilidades le aporta el transporte, pudiendo crear nuevas centralidades en lugares donde antes no había gran actividad o era suelo agrícola. Estas pautas han afectado a la localización de las actividades a lo postulado, en cierta medida, por las teorías de localización y la valoración del precio del suelo de Christaller (1933), de Von Thünen (1826) y de Weber (1909), en la que la escasez de suelo es una condición a tener en cuenta.

Estas tendencias en la ordenación del territorio han obligado, por su parte, a ampliar y dotar de capacidad suficiente la red de transporte para poder satisfacer las relaciones que se establecen entre las diferentes zonas que, pese a ser consideradas incompatibles espacialmente, son complementarias para la realización de sus actividades. En cierta medida, conceptos de la disciplina urbanística como por ejemplo el de la Ciudad Jardín o los planteamientos urbanísticos T.O.D. (*Transit Oriented Development* – Desarrollos orientados al transporte público), entre otros, explotan estas tendencias, requiriendo un cierto grado de coordinación.

En el caso europeo, la superficie dedicada a edificaciones e invernaderos ha sido incrementada en un 20% entre 1990 y 2015, llegando casi a los 200.000km² de superficie (entorno 4,5% superficie de la Unión Europea) pese a que la población ha experimentado incrementos muy inferiores (Paresi, Melchiorri, Siragusa, & Kemper, 2016), así como la red de carreteras que, de acuerdo con Eurostat³ (2017d, 2017a, 2017b) entre 1990 y 2014, creció

medida del que es conocido que su límite inferior es constante, la distancia, e inversamente proporcional a otra magnitud que es variable, la velocidad. Un incremento de la velocidad supone una reducción de tiempo y un acercamiento percibido de los lugares.

³ Estos valores se han obtenido de los datos de la base de datos de Eurostat. En cada cálculo, se han omitido los países con valor no disponible en uno de los extremos o aquellos cuya medición corresponde a una definición diferente y señalada en la tabla, con el superíndice (d) (véase el caso de España en road_if_roadsc y road_if_motorwa). Los valores de la red de autopistas son uniformes para todos los casos, aunque no todos los países de la Unión Europea se han podido introducir.

entre un 28% y un 31%, siendo la red de autopistas la que mayor incrementos experimentó, con alrededor un 76% de incremento; todo ello con el consecuente incremento de superficie dedica a carreteras estimada entorno al 12% medido en 11 países de la Unión Europea (European Environment Agency, 2006).

Sin embargo, como efecto secundario, estas tendencias y realidades territoriales pueden imposibilitar la realización y participación de gran parte de las actividades sino es mediante el desplazamiento con medios motorizados, lo cual crea sociedades más dependientes del transporte, especialmente con aquellos destinos que solo son, en la práctica, accesibles mediante el uso de medios de transporte motorizados privados.

Si bien el tiempo que se dedica para acceder/regresar de estudios o trabajo, la llamada movilidad obligada, ha permanecido estable entorno a los 60 minutos en los últimos cien años, no ha ocurrido lo mismo con la distancia recorrida en viajes únicos⁴, la cual ha aumentado debido al incremento de velocidad general de los medios de transporte, y a la posible relocalización y distanciamiento de los puntos de interés (D. M. Levinson & Kumar, 1994; D. M. Levinson & Wu, 2005). Nótese como la tasa de coches por cada 1.000 habitantes, en la Figura 1.1, ha aumentado en los últimos años en Europa, pudiendo ser causa y efecto de las tendencias y valores mencionados en los párrafos anteriores, tal y como se explica en McIntonsh, Trubka, Kenworthy, y Newman (2014).

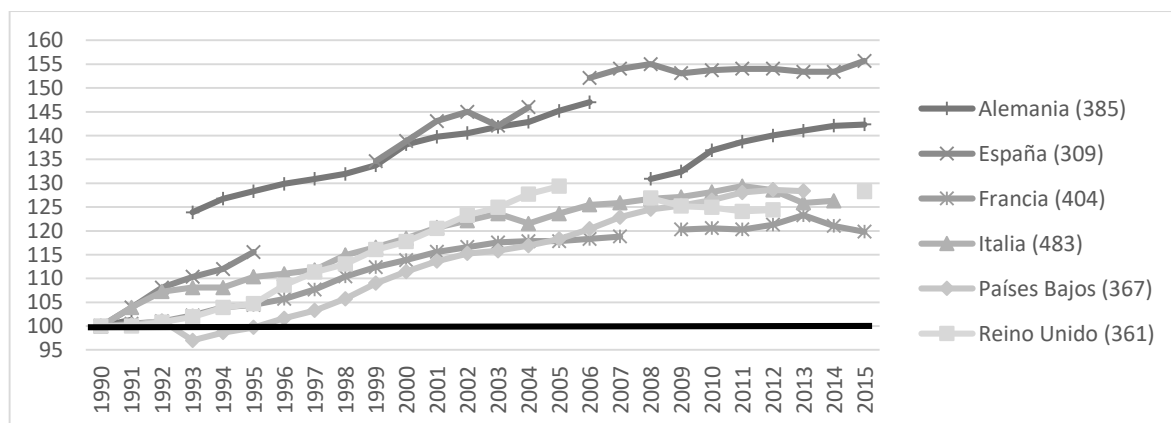


Figura 1.1: Evolución tasa de coches por cada 1.000 habitantes para los 5 países europeos.

Base 100 = valor del año 1990 – Entre paréntesis, coches por cada 1.000 habitantes en 1990. Fuente: Eurostat (2017c).

⁴ Puede incluir varias paradas intermedias o desviaciones respecto a la ruta más corta entre el punto OD para satisfacer estas paradas intermedias

La necesidad de cumplir una serie de horarios impuestos por el tipo de actividad a realizar y sus horarios, así como que todo el desplazamiento se debe realizar sobre una red de capacidad finita y con destinos distribuidos en el territorio, puede llevar a que la demanda total de uso de algún tramo de la red del transporte supere a ciertas horas la oferta y se produzcan situaciones de congestión (Ortúzar & Willumsen, 2011), como es el caso del coche, o de saturación y no satisfacción de los servicios planeados usar, como puede pasar en el transporte público.

Por ejemplo, que de acuerdo con los datos de las encuestas normalizadas del uso del tiempo (HETUS) de Eurostat (2009), entre las 07.00 y las 09.00, entre un 15% y un 30% de la población debe desplazarse para llegar a sus puestos de trabajo o estudio, tal y como se ve en la Figura 1.2. Esto provoca que en la punta entre las 07.30 a 08.00, entre un 5% y un 10% de la población se encuentre en desplazamiento de movilidad obligatoria, no presentándose una punta tan marcada en hacia las horas del medio día o de la tarde. Nótese como hasta antes de las 11.00, los países mostrados en la Figura 1.2 muestran un comportamiento similar en cuanto a la tendencia de personas en puestos de trabajo o de estudio, aunque sus valores pueden diferir; es a partir de esa hora en la que cada país muestra una evolución diferente.

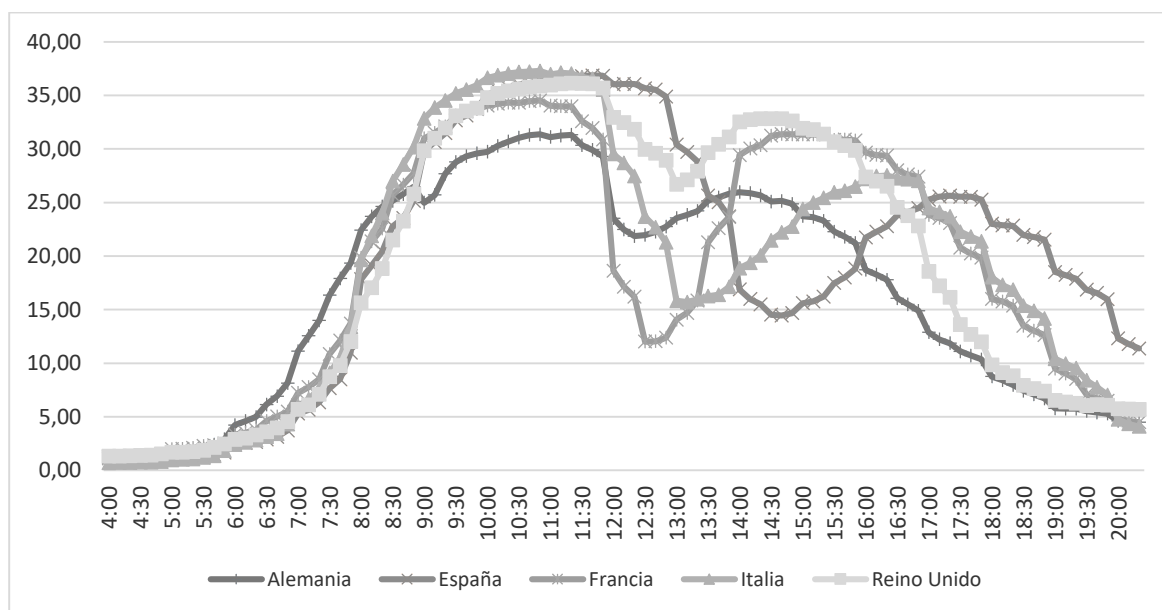


Figura 1.2: Porcentaje de población en puesto de trabajo o estudio a lo largo de un día.

Fuente: Eurostat (2009).

La congestión recurrente⁵, cuyos efectos en el territorio es el tema principal de la tesis doctoral de la manera que se detalla en posteriores párrafos, y que es aquella que se produce habitualmente no siendo causada por accidentes u otras situaciones anómalas (Stopher, 2004), suele asociarse a zonas con alta concentración de personas/actividades (Mondschein & Taylor, 2017). Esto se debe a que el suelo de esas zonas es escaso y de alto valor (Rode et al., 2014), debiendo decidir si destinar suelo a actividades productivas, o dedicarlo a infraestructuras o equipamientos relacionados como son los aparcamientos⁶ para el caso de los coches⁷.

En ese *trade-off* entra el concepto de que la ciudad o su área metropolitana puede estar delimitada por la congestión (Gospodini, 2002; Turok & Mykhnenko, 2007) puesto a que los beneficios de la concentración de actividades no podrían compensar los costes de la congestión si ésta es excesiva (Batty, 2008; B. D. Taylor, 2004). En líneas generales se ha observado una relación hiperlineal entre densidad de población/actividades y congestión en las áreas metropolitanas (Louf & Barthelemy, 2014), aunque también se señala que el coeficiente disminuye a medida que aumenta la población (Chang, Lee, & Choi, 2017).

La congestión ha sido presentada normalmente como una ineficiencia del sistema de transportes que restringe la capacidad de los usuarios a acceder a los destinos y condiciona la movilidad. Bajo esta perspectiva y tomando como escenario de referencia la situación libre de congestión⁸, se ha estimado que incrementa los tiempos de viajes desde los 27 minutos para Madrid hasta los 42 minutos en 2016 tal y como se ve en la Figura 1.3 con datos de TomTom (2017).

⁵ En esta tesis se usará el concepto congestión para referirse a la congestión recurrente.

⁶ Se estima que en Europa en 2012 hay entre 237 millones y 285 millones de plazas de aparcamientos de acceso público, incluyendo zona de carga y descarga y las destinadas a motocicletas, además de las, aproximadamente, 155 millones de plazas privadas. De estas plazas, entorno el 45% se encuentran en la misma calle y se estima que el 85% se encuentran en espacios abiertos. se puede estimar que existen entre 0,9 a 1,2 plazas de aparcamiento públicas por coche de pasajeros para el global de Unión Europea. (European Parking Association, 2013; Qpark, 2014).

⁷ El tráfico que busca aparcamiento, llamado tráfico de agitación, se ha estimado entre el 9% y el 74% del total que circula en varios estudios hasta 2001 (Shoup, 2006) contribuyendo a la congestión. Se estima que 44 horas al año tardan los británicos en encontrar aparcamiento, o 41 horas para Alemania, aunque estos valores empeoran para los entornos metropolitanos: En Londres es de 67 horas/año, en Berlín de 62 horas/año y en Hamburgo de 52 horas/año. (Cookson & Pishue, 2017).

⁸ Véase la sección 1.3.4.

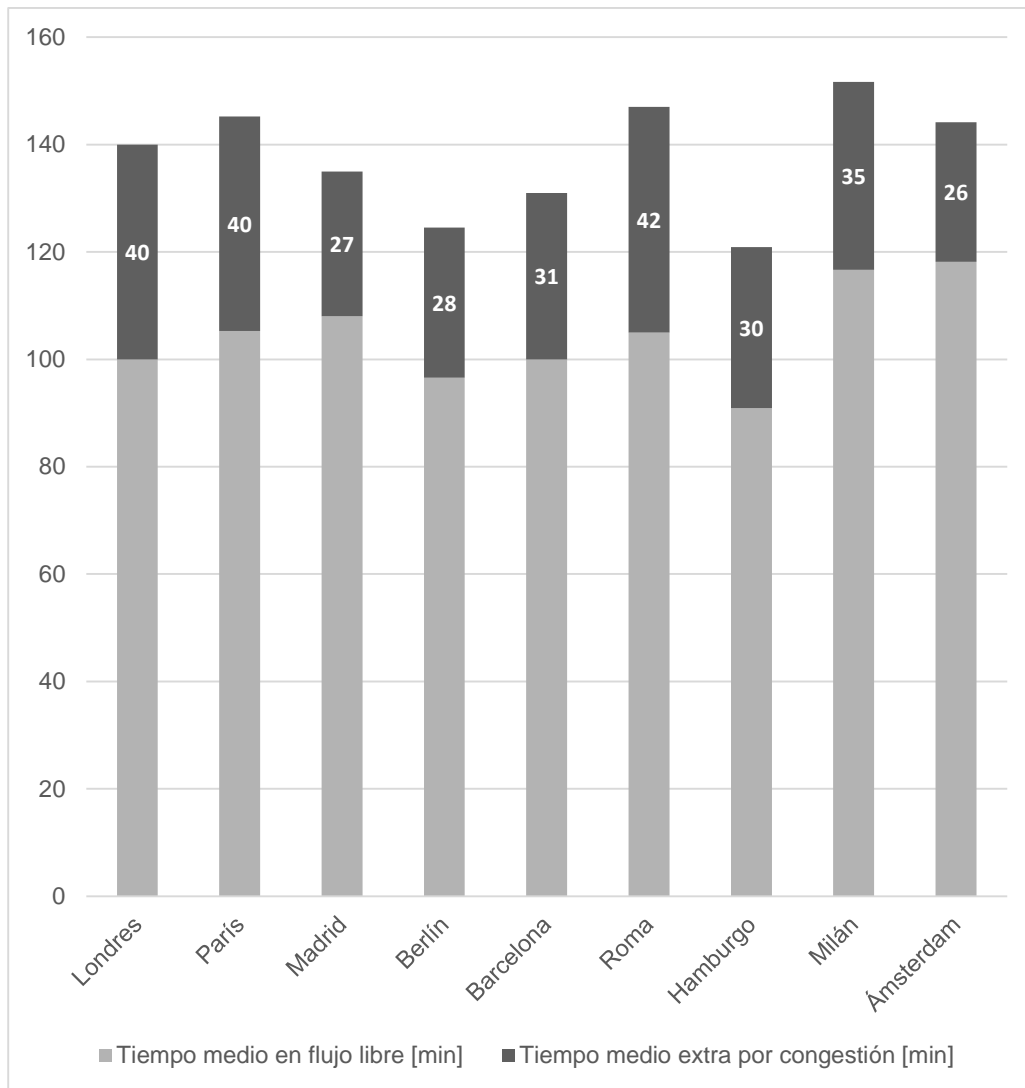


Figura 1.3: Tiempo de viaje medio de cada ciudad en flujo libre y en congestión para 2016 según TomTom Traffic Index. Los números de en las columnas son los minutos extras de viaje debido a la congestión.

En términos relativos, y desde el año 2009, se puede como el tiempo extra debido de congestión con respecto al tiempo de viaje en flujo libre para las 9 ciudades de la Figura 1.4 es superior al 18%, pudiendo llegar casi a suponer un 45% más de tiempo de viaje según TomTom (2017). Nótese además que, casi todas las ciudades mostradas muestran perfiles en forma de U, siendo algunos de los valores más recientes peores que los del inicio de la serie histórica, exceptuando Ámsterdam, Milán y Roma. Esta última ciudad, sin embargo, es la que históricamente ha mostrado los peores resultados, incluyendo los dos últimos registros que están igualados con los de la ciudad de Londres.

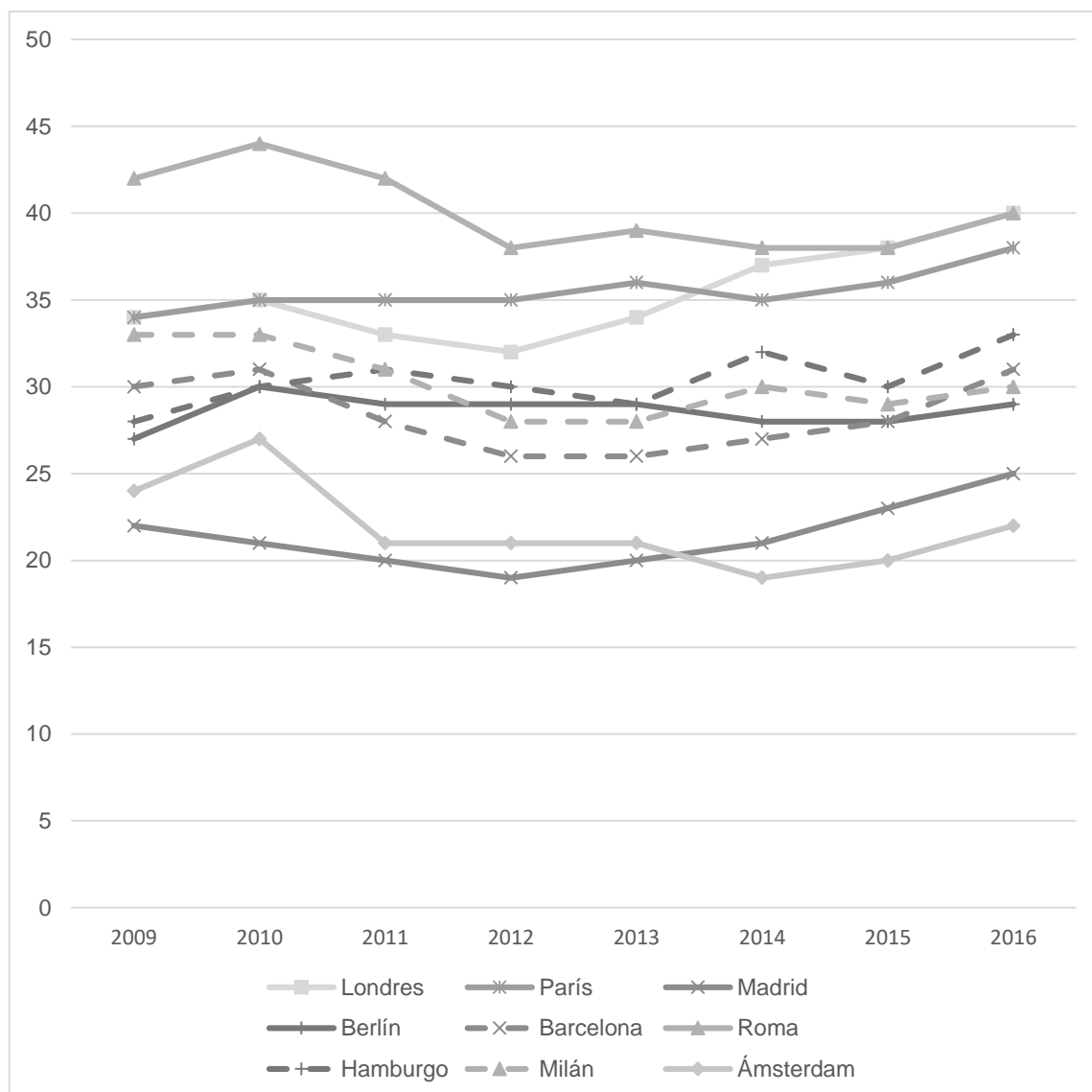


Figura 1.4: Evolución del % de incremento de minutos de viaje debido a la congestión con respecto al valor medio de viaje en flujo libre según TomTom Traffic Index. Fuente: TomTom (2017).

Para el conjunto de la Unión Europea se estimó que los costes de la congestión equivalen al 1% del PIB (Christidis & Ibáñez Rivas, 2012), y se estima que para 2025 el coste de la congestión en algunas de las principales ciudades europeas puede llegar a más de 90.000 millones de Euros distribuidos tal y como se muestra en la Figura 1.5, que representa los datos del informe de INRIX (2016).

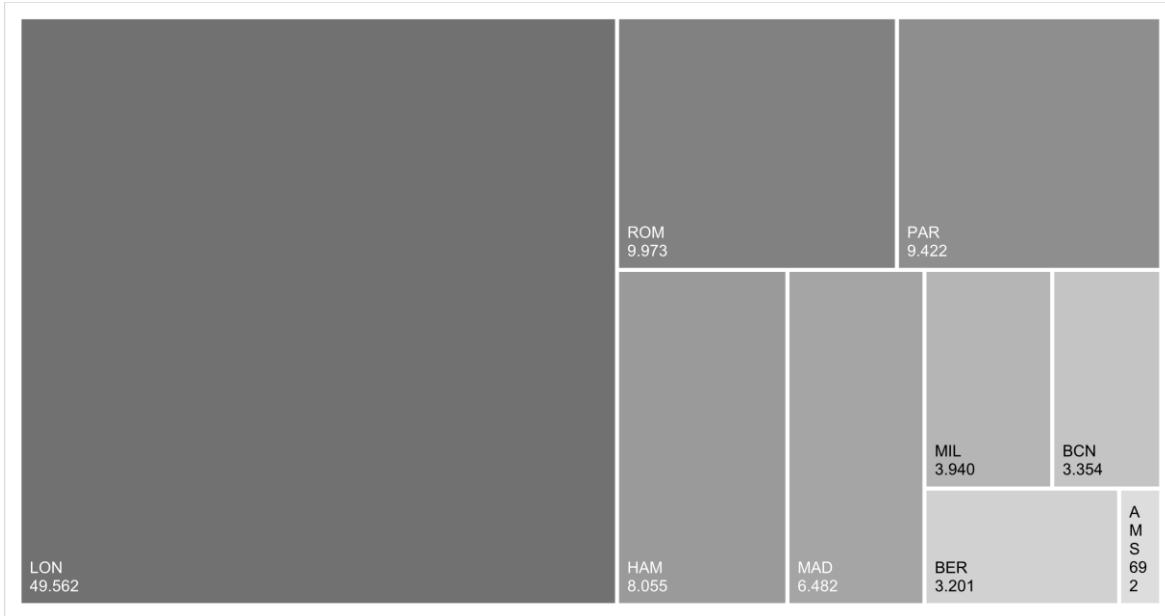


Figura 1.5: Coste de la congestión en 2025 según INRIX para los términos municipales de las ciudades de los casos de estudio y Ámsterdam (Países Bajos). Valor en millones de Euros⁹. Los nombres de las ciudades usan los códigos IATA (2014). Fuente: Cookson (2016).

La congestión también produce externalidades negativas como son ruido, polución, un incremento del potencial de accidentes y acortamiento de vida de vehículos (OECD, 1999), así como puede reducir la resiliencia de la red de transportes, propagar de sus efectos por la red hacia zonas o usuarios no ubicados en dónde se produce el atasco (los llamados efectos de desbordamiento o *spillovers*), o afectar a servicios de transporte público, incluyendo a la población que depende de él, y a servicios de urgencias que, pese poder circular algo más rápido, también puede ver reducida su capacidad de actuación.

Además, la congestión puede provocar algunas reacciones, no necesariamente inmediatas, sobre los usuarios, desde cambios de rutas y horarios con el objetivo de minimizar el tiempo de viaje a realizar, hasta posibles recolocaciones a lugares en busca de menor afectación por la congestión a medio o largo plazo si el coste que les supone la congestión es superior al que pueden/están dispuestos a pagar (de Abreu e Silva & Goulias, 2009; D. M. Levinson & Kumar, 1994; M. N. Sweet, 2011, 2014).

La estrategia tradicional para intentar solucionar el problema de la congestión, entendiéndose

⁹ El informe original estaba expresado en libras esterlinas. Se aplicó el cambio 1£ = 1,1811€ (último valor del 30 de noviembre de 2016)

como solucionar el eliminar estos costes, es optar por dedicar mayor espacio a la misma red de transporte, lo cual puede fomentar/reforzar el “circulo vicioso de la congestión” (Handy, 2005a): Mayor capacidad en la red de carreteras puede iniciar un proceso en el que no solo tráficos ya existentes pueden usar las nuevas infraestructuras o de que la demanda latente, aquella que no podía usar la infraestructura por el motivo que fuese, ahora empiece a usar dicho modo de transporte e infraestructura, sino que hay procesos de atracción de tráficos y/o concentración de actividades en las zonas servidas, y de generación de nuevos tráficos debido a nuevas actividades; la suma de todos ellos pueden volver a generar una situación de congestión. Nótese que en los dos últimos casos requieren los usos del suelo tal y como se ha expuesto al principio de esta sección aprovechando las nuevas infraestructuras.

Las soluciones solamente basadas en la infraestructura no solo pueden no ser económicamente viable, como es el caso en que el sistema productivo no puede compensar los costes reales de estas actuaciones incluyendo su coste de oportunidad (Wheaton, 1998) o pudiendo suponer incluso una reducción de las prestaciones si se utiliza el concepto de velocidad efectiva de Illich (1974), pudiendo incluir el punto de vista social propuesto por Crozet (2017), sino que pueden afectar a otro tipo de transportes, como por ejemplo es la afectación para los peatones, y a las relaciones de ecosistemas naturales (Litman, 2014). Esto se debe a que las nuevas infraestructuras u ordenación del espacio público pueden crear barreras, incluso si se estudia como disminuir esta externalidad mediante algún intento de permeabilización.

Eliminar completamente la congestión no solo es altamente improbable, sino que puede ser una solución no aceptable, puesto a que puede provocar, en el peor de los casos, la destrucción de la concentración de personas/actividades, creando que esos lugares centrales ya no seas atractivos, debido a que se ha destinado todo el suelo dispone a infraestructuras. Incluso las nuevas formas de concepción del transporte solo podrán mitigar los efectos de la congestión, pero no eliminarla. La congestión debe ser gestionada adecuadamente, pudiendo partir de la base que señala Litman (2009, pp. 1–6) “... *describiendo la congestión como un coste, se reconoce que hay una cierta cantidad aceptable comparado con los costes que supone eliminarla*”¹⁰.

Puesto a que la congestión no es solamente un problema puntual que se deba asociar

¹⁰ Cita original «... describing it (congestion) as a cost recognizes that a certain amount of congestion may be acceptable compared with the costs involved in eliminating it»

exclusivamente al sistema de transportes, sino que también es consecuencia del propio diseño del sistema de transportes, la distribución e intensidad los usos del suelo, la sociedad y las diferentes interrelaciones que se producen, es adecuado explorar el uso de otros indicadores que permitan incorporar dichas componentes, que puedan mostrar otras causas y efectos de la congestión, y así determinar posibles efectos secundarios que hacen que las algunas soluciones no sean convenientes (Levine & Garb, 2002).

De la misma forma, también deben incluirse estas “*otras componentes*” en las estrategias de gestión de la congestión, como por ejemplo medidas directas sobre los usos del suelo (Stopher, 2004), o incidir en los horarios de algunas de algunas de las actividades para laminar la necesidad de llegada de personas a ciertos destinos o de salida para ciertos orígenes, y que requieran usar todas ellas la red al mismo tiempo.

La tesis doctoral, se exploran las oportunidades, retos y limitaciones que ofrece el uso de las medidas y análisis de la accesibilidad, dentro del entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG o G/S por sus iniciales en inglés), para el estudio de la congestión más allá de su concepción de problema de la red de transporte. La accesibilidad, que puede definirse como un indicador que permite valorar el rendimiento del sistema usos del suelo – transporte – sociedad y que se detalla en secciones posteriores, puede ser empleada para determinar ampliar la visión del problema de la congestión más allá de la respuesta a las preguntas centradas exclusivamente en la red de transporte, tales como en dónde se produce la congestión sobre la red, durante cuánto tiempo o qué coste supone con respecto a un escenario “ideal”.

1.2. Preguntas de investigación, objetivos y estructura de la tesis

En la sección introductoria, se ha presentado el interés en el que se sustenta esta tesis por el estudio con más detalle del fenómeno de la congestión. A continuación, se presentan las preguntas de investigación que se tratarán de responder, dentro de la medida de lo posible, en función de los resultados obtenidos de los análisis de los casos de estudio propuestos, y que permiten concretar el objetivo principal y los objetivos específicos de la tesis doctoral. Para finalizar, se explica la estructura de la tesis doctoral.

1.2.1. Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación de la tesis doctoral son:

- a) *¿Es la accesibilidad un buen indicador para conocer y evaluar los efectos y consecuencias de la congestión en el territorio?*

Esta primera pregunta corresponde a evaluar, de manera teórica, en qué medida el uso de las medidas de accesibilidad puede aportar nuevos conocimientos sobre las causas y efectos de la congestión en el territorio, así como exponer sus limitaciones conceptuales para entender el ámbito en que se pueden analizar los resultados obtenidos.

- b) *¿De qué manera se puede incorporar el dinamismo de los componentes de las medidas de accesibilidad, con especial atención para el estudio de la congestión?*

Esta pregunta está vinculada específicamente al segundo objetivo específico y al cumplimiento práctico de la pregunta anterior. La introducción del dinamismo en las medidas de accesibilidad, tradicionalmente estáticas, supone la necesidad de evaluar diferentes alternativas de hacerlo adecuadamente y qué aporta cada una para decidir cuál o cuáles pueden ser las más adecuadas para ser incorporadas en estudios y valoraciones de causas y efectos de la congestión.

- c) *¿Pueden las nuevas fuentes sobre redes de transporte y el análisis dinámico en SIG mejorar y ampliar el conocimiento sobre el impacto de la congestión en la accesibilidad?*

En la actualidad, se disponen de los métodos y mecanismos de captación, almacenamiento y análisis de grandes volúmenes de datos, generados a gran velocidad y con una amplia variedad de formatos, ampliamente conocidos como Big Data. Además, parece que recientemente hay un redescubrimiento de la componente geografía de los datos que pueden ser tratadas en SIG, en lo que se podría llamar el GeoBigData. Esta pregunta de investigación va orientada en el sentido de reflexionar como los nuevos datos permiten superar limitaciones en estudios anteriores por falta de datos o agregaciones excesivas, de cómo las nuevas técnicas deberían permitir tratar los mismos, y que beneficios aportan frente a los estudios realizados con los datos usados en estudios anteriores.

- d) *¿Qué técnicas de cartografía animada pueden ayudar presentar de una forma adecuada los resultados de accesibilidad desde una perspectiva dinámica?*

Ligado al quinto objetivo, se estudiará de qué maneras se pueden presentar correctamente los resultados obtenidos mediante diferentes tipos de animaciones y mostrar el comportamiento dinámico de los resultados. En este apartado también se estudiará que elementos estáticos deben estar presentes en cada animación para facilitar la interpretación geográfica de los resultados, y cuáles de ellos son prescindibles en las animaciones pero que deben estar ser mostrados en cartografías estáticas, así como el tipo de análisis que se puede hacer directamente observando las animaciones y qué se puede extraer de cada fotograma.

- e) *¿Qué impacto tiene la congestión en la accesibilidad diaria de las grandes ciudades europeas?*

Esta pregunta tiene como objetivo entender como el uso de los sistemas de transportes que provoca congestión afecta, de manera general, a la cantidad de interacciones potenciales que se podrían establecer entre los individuos y cuál es la evolución diaria de cada una de ellas. La respuesta a esta pregunta permite establecer un marco comparativo del rendimiento del sistema usos del suelo – transporte – sociedad en cada una de las ocho áreas metropolitanas de la Unión Europeas elegidas para este estudio.

f) ¿Cómo afecta la congestión a la distribución de la accesibilidad interna en las grandes áreas metropolitanas europeas?

Relacionada con la pregunta anterior, la afectación de la congestión será difícilmente uniforme dentro de cada ámbito de estudio, puesto a que difícilmente la dotación de infraestructuras y de oportunidades próximas, así como de localización, duración e intensidad de los atascos, está repartida uniformemente. El conocer y mapear las diferencias de los patrones de evolución de los valores de la accesibilidad entre las zonas que, de una manera u otra, se ven afectadas por la congestión debido al efecto *Spillover* no solo permite conocer la resiliencia de cada zona a la congestión del ámbito en el que se encuentra dentro de los estudios de esta tesis, sino también permite deducir características latentes de cada zona que puede permitir explicar el porqué de estos valores y el porqué de su comportamiento en relación a zonas próximas.

g) ¿Cómo modifican los cambios en las redes de carreteras los impactos de la congestión en la accesibilidad?

En muchos casos, tal y como se ha comentado en la introducción, se intenta mitigar la congestión mediante cambios y ampliaciones de la red de transportes. Sin embargo, la congestión puede deformar los efectos reales de estas mejoras debido a los cambios de rutas y a la generación e inducción de nuevos tráfico. En esta tesis se intentará estimar el efecto de una serie de ampliaciones de la red sobre la distribución espaciotemporal de los valores de la accesibilidad para el caso de dos *dataset* de velocidades observadas, revelando el verdadero efecto de estas modificaciones en el territorio. Este punto va relacionado con trabajos recientemente realizados como por ejemplo por Levine, Merlin y Grengs (2017).

h) ¿Cómo el cambio de la distribución de las oportunidades afecta a la distribución de la accesibilidad? ¿Mitiga o acentúa los efectos de la congestión? ¿En qué grado?

De forma análoga a la pregunta anterior, la modificación de la distribución e intensidad de las oportunidades también afecta al valor y distribución espaciotemporal de la accesibilidad. En este trabajo se valorará la influencia de las variaciones en las oportunidades combinadas con los efectos de la congestión en la accesibilidad para determinar su rol desde dos perspectivas: la primera asumiendo que estos cambios son estáticos tal y como se supone en los estudios de accesibilidad estática, y el otro en que estos valores también cambian a lo largo del escenario.

- i) *¿Cómo puede el estudio de la accesibilidad dinámica contribuir a una planificación más eficiente del sistema de transporte y usos del suelo?*

Las posibles respuestas a esta última pregunta, la cual está estrechamente vinculada con el último objetivo específico, consisten en la valoración de la síntesis de los resultados, análisis y conclusiones de todas las anteriores desde un punto de vista operativo, tanto para determinar que enseñanzas y aportaciones para una posible mejor gestión del sistema usos del suelo – transporte – sociedad se pueden extraer del presente trabajo en materia de accesibilidad con componentes con comportamiento dinámico, y proponer cómo podrían ser incorporados en los instrumentos de planificación territorial y en las herramientas de seguimiento y evaluación de los objetivos previstos por dichos instrumentos.

1.2.2. Objetivo principal

El objetivo principal de esta tesis es introducir una perspectiva dinámica en el estudio de la accesibilidad, que permita evaluar las consecuencias de la congestión. Este objetivo se enmarca en el contexto del análisis del fenómeno de la congestión recurrente dentro de la amplitud del sistema usos de suelo – transporte – sociedad, mediante adaptaciones adecuadas en el concepto y en la medida de la accesibilidad a la realidad dinámica que define la congestión. De esta manera se intenta ampliar el entendimiento de las causas primeras de la congestión y la posibilidad de comprender cuáles son las consecuencias internas y externas (externalidades) en dicho sistema que altera y que es esencial para plantear soluciones eficientes.

Este planteamiento, que incorpora directamente conceptos de geografía humana, va más allá de entender la congestión como un problema propio de la componente de transportes, y cuyas posibles soluciones están en esta componente, y en el que se han basado en la evaluación de pérdidas de rendimiento de manera local dentro del mismo sistema de transporte o en las consecuencias que la congestión genera con los elementos relacionados con la componente (consumo de combustible, emisión de contaminantes y horas pérdidas en carretera o incrementos de flota para compensarlo).

La tesis se aprovecha de las nuevas fuentes de datos disponibles, en especial en lo referente a las redes de carreteras, pero también a la hora de incorporar el papel de la distribución de las actividades urbanas. Aprovechando la escala global de las nuevas redes de carreteras, se

estudiará el efecto de la congestión en la distribución y evolución temporal del valor de la accesibilidad en diferentes entornos de la Unión Europea¹¹: Las áreas metropolitanas de Londres (Reino Unido de la Gran Bretaña e Irlanda del Norte), París (Francia), Madrid y Barcelona (España), Berlín y Hamburgo (Alemania), y Roma y Milán (Italia) con datos de congestión de los años 2011 y 2012 obtenidos por TomTom, y los Países Bajos para datos de congestión referentes a los periodos de 2009 a 2011 y de 2012 a 2014, también obtenidos por TomTom¹².

1.2.3. Objetivos específicos

En esta tesis se pretende estudiar los efectos dinámicos de la congestión sobre la accesibilidad, medida en diferentes ámbitos espaciales y para diferentes periodos temporales dentro de la Unión Europea. Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. *Revisar la bibliografía existente sobre el concepto de accesibilidad y sus componentes, así como de las diversas metodologías propuestas para su cálculo, análisis, interpretación de sus resultados y de experiencias en diferentes ámbitos de estudio, prestando especialmente atención a los estudios de la accesibilidad desde una perspectiva dinámica.*

Al iniciar cualquier trabajo de investigación, se debe realizar una búsqueda, lectura y síntesis de las investigaciones anteriores o en curso conocidas y sus metodologías sobre la temática propia de la investigación. Este proceso, que debe seguir realizándose a lo largo de la investigación, permite establecer un marco teórico y comparativo adecuado y actualizado en el que se sustente la investigación. La elaboración de esta tesis no es una excepción en este aspecto.

En el caso concreto de investigaciones en las que se use el concepto de accesibilidad, este objetivo específico es de gran importancia puesto que no existe una definición única del concepto y mucho menos una única metodología de cálculo, tal y como se detalla en secciones posteriores. Este hecho requiere un estudio y evaluación pormenorizada, en la medida de lo posible, de las diferentes técnicas ya propuestas para determinar cuáles son las ventajas, limitaciones, retos y oportunidades de cada una de ellas, así como los análisis y

¹¹ Las referencias de pertenencia a un país o de formar parte de la Unión Europea se hacen teniendo en cuenta la relación formal existente y reconocida por la Unión Europea el momento de finalización de la redacción de la presente tesis, pese a que a le existencia de procesos de independencia o abandono de la Unión Europea.

¹² Nótese como algunos ejemplos anteriores solo han mostrado los datos de los países de los entornos que se usan en esta tesis doctoral.

aspectos relacionados con los diferentes elementos que deben ser tomados en consideración en la tesis, especialmente en aquellos que puedan incorporar el comportamiento dinámico y que permitan entender el efecto de la congestión en el territorio.

2. *Establecer una metodología adecuada para el estudio del dinamismo de los diferentes componentes de la medida de accesibilidad, y en especial, aquellas que permitan el estudio de los efectos de la congestión.*

Introducir una perspectiva dinámica en las medidas de accesibilidad implica toda una serie de retos y posibles consecuencias teóricas en cada uno de los pasos necesarios para obtener los indicadores que deben ser analizados y tomadas adecuadamente en consideración, para garantizar el mantenimiento de la utilidad del concepto accesibilidad en éste y futuros estudios.

Pese a que algunos de estos retos y consecuencias pueden haberse expuesto en diferentes investigaciones de manera aislada y/o en forma de crítica a las técnicas tradicionales, el presente objetivo pretende, en la medida de lo posible, unificarlos dentro del mismo marco contextual para obtener una visión unificada de cómo tratar el dinamismo dentro de la accesibilidad.

Nótese que, en todo caso, el dinamismo de alguna de la componente de la accesibilidad puede provocar que los efectos de sus cambios se propaguen en sentido contrario al avance del tiempo, lo cual también afectará la definición de los valores del indicador, siendo el mismo indicador que deberá definir la forma en como captura este fenómeno. En consecuencia, el valor de accesibilidad cada zona dependerá del valor de la intensidad de atractividad de cada destino y de la duración del viaje hasta llegar ese destino.

Como resultado de este objetivo específico, se espera establecer modificaciones generalistas de algunas de las técnicas de medición tradicionales que incorporen claramente la naturaleza dinamismo, así como la propuesta de pautas de posibles aproximaciones y simplificaciones útiles para cada tipo de estudio, especialmente los relacionados con los efectos de la congestión. En todo caso, también se explorarán las limitaciones teóricas de dichos métodos necesarios para una interpretación adecuada de los resultados.

3. *Conocer y evaluar las fuentes y bases de datos que permitan conocer la variación de la velocidad en tramos de la red de carreteras a lo largo del día, así como la distribución espacial de las oportunidades de interés en las áreas de estudio y determinar los mecanismos de pretratamiento adecuados para su incorporación en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y el cálculo de medidas de accesibilidad dinámicas que permitan evaluar los impactos de la congestión.*

El conocimiento en profundidad de las diferentes fuentes y bases de datos que son candidatas a ser usadas en un estudio y de cómo poder usarlas es de gran importancia en el momento de conocer qué se puede obtener con ellas y qué no.

Los diferentes tipos de datos que se usen, ya sean primarios o secundarios, tienen una serie de definiciones y limitaciones propias de los métodos de captación de valores, de almacenamiento y de tratamiento de los datos que es conveniente tener presentes tanto para decidir cómo usarlos y cómo seguir tratándolos para adecuarlos a los diferentes métodos de cálculo de los indicadores usados y a las demandas de las diferentes herramientas a usar, como también para conocer las posibles influencias directas y de sus interacciones que pueden afectar al valor final calculado y sus efectos en las interpretaciones a realizar.

Para la realización de la tesis doctoral se va a requerir mezclar varios tipos de datos y de diferentes fuentes, los cuales conformarán el *dataset* para el cálculo de las medidas de accesibilidad, requiriendo el uso de datos que se pueden considerar permanentes a lo largo de cada escenario y otros que cambian a lo largo del estudio. El cumplimiento de este apartado puede afectar especialmente al objetivo específico anterior, al posterior y al último, y que como las apreciaciones que se realicen a lo largo del documento pueden ser tomados en consideración para futuras toma de datos explícitamente orientadas a estudios de la congestión.

4. *Proponer diferentes metodologías para el análisis de los resultados de la distribución espaciotemporal de los valores de accesibilidad dinámica, y la relación, efectos y consecuencias de los cambios que existen entre accesibilidad, la congestión y la movilidad, y las oportunidades en el contexto de los casos de estudio.*

La introducción de componentes dinámicas en la medida de accesibilidad también afecta en la interpretación de los resultados obtenidos por diversas razones. Una de ellas es por incorporar desfases entre la propagación de los efectos del dinamismo sobre los valores

obtenidos, definidos en la metodología de cálculo y en el diseño de los escenarios a comparar. Otra es por el hecho de que los resultados ya no son valores inherentemente puntuales, sino que podrán ser datos funcionales, formando series temporales. Este objetivo específico será el que deberá validar la relación entre los resultados y el objeto de estudio.

Para abordar el análisis de los resultados se proponen utilizar algunos métodos considerados adecuados desde dos perspectivas diferentes, pero no excluyentes: por un lado, y con el objetivo de aprovechar el conocimiento derivado de la interpretación de resultados de la accesibilidad estáticos, se estudiará aquellas posibles adaptaciones de los análisis descriptivos tradicionalmente usados y/o la transformación de los resultados obtenidos a valores puntuales.

Por el otro lado, y aprovechando la naturaleza dinámica de los resultados, éstos se estudiarán con técnicas propias de los datos funcionales que permiten tener en consideración múltiples aspectos que pueden enmascarse por transformaciones a otro tipo de variables como son por ejemplo la evaluación de las tendencias.

Los análisis de la tesis se realizarán tanto desde el punto de vista de valores absolutos (número de oportunidades percibidas reales), como relativos a uno de los valores de la serie que pueda servir de marco comparativo. De la misma manera, se deberá identificar posibles mensajes contradictorios y explicar el porqué de los mismos.

5. *Explorar diferentes formas para la representación cartográfica de los resultados de la accesibilidad dinámica, que faciliten y garanticen un correcto y amplio análisis de los mismos y una adecuada transmisión de los resultados y conclusiones obtenidas al resto de la comunidad científica, política o general.*

La presentación gráfica de los resultados obtenidos de tipo dato funcional, es decir, con componente dinámica, de una manera sencilla de entender y que permita no solo contestar a las preguntas inicialmente planteadas, sino también formular nuevas preguntas (e incluso contestarlas) es necesaria tanto para las labores propias de análisis de los resultados y de su validación (tanto este objetivo como el anterior están estrechamente ligados), como también para transmitir el mensaje obtenido a aquel público que no es experto en la materia, y/o no puede detenerse en los detalles de la misma, pero requiere de conocer la valoración y tendencias obtenidas.

Para ello, se estudiarán, tanto explícitamente como implícitamente, diferentes técnicas de representación de los resultados de accesibilidad en mapas estáticos tradicionales, así como animaciones y cartogramas, en las que se explorará la importancia de cada elemento disponible a cartografía y sus adaptaciones según sea el tipo de representación usada. Este objetivo específico tiene, además, un ligero toque artístico, demandado en los actuales trabajos de analista de datos.

6. *Obtener resultados que ayuden a establecer y evaluar políticas y actuaciones sobre el sistema transporte, usos del suelo, sociedad que permitan una mejor gestión de la congestión, mediante decisiones tomadas con la incorporación adecuada de los indicadores de accesibilidad dinámica.*

El cumplimiento de los objetivos específicos anteriores debe generar, en la medida de lo posible, la recopilación, justificación y aplicación de cómo la accesibilidad puede aportar un nuevo enfoque en la evaluación de las consecuencias de la congestión tanto para su uso en planes estratégicos y operacionales de cualquiera de las componentes que la conforman, y de cómo este indicador podría ser tenido en cuenta para el planteamiento de solución en posibles procesos de tomas de decisiones o como criterios de evaluación mediante los casos de estudios propuestos.

Aunque en este trabajo los casos siempre serán sobre observaciones pasadas o que podrían haber sido según como se combinen los datos, y a que éstos serán altamente dependientes de los ámbitos de estudio propuestos y a las limitaciones propias de los indicadores usados, los resultados obtenidos e interpretaciones realizadas permitirán establecer relaciones de sobre la calidad de la resiliencia a la congestión debido a la coordinación entre cada componente de manera general y específica de cada zona de las áreas de estudio.

A la vez, los resultados obtenidos deben ayudar a entender como la congestión puede afectar a la cohesión territorial desde el punto de vista de la distribución de los valores de la accesibilidad, de cómo cambian los efectos sobre el territorio si se modifican las características de otra componente y manteniendo el resto inalteradas, o de una estimación indirecta de los efectos *Spillover*, desbordamiento de las consecuencias definidos a un cambio localizado por el efecto red, no solo territorialmente sino también espacialmente.

1.2.4. Estructura de la tesis

La tesis doctoral se presenta por “compendio de publicaciones”. Está estructurada en tres bloques para poder cumplir los objetivos planteados y obtener respuesta para las diferentes preguntas de investigación formuladas.

En el primer bloque, del que la presente sección forma parte, se exponen los motivos por los cuales se considera de interés estudiar los efectos de la congestión en la red de transporte sobre el sistema usos del suelo – transporte – sociedad. Tras la definición de los objetivos y preguntas de investigación, se establece el marco teórico y estado del arte sobre el concepto de accesibilidad y sobre la generación de la congestión en las redes de carreteras, incidiendo especialmente en el reto que supone la incorporación del dinamismo en el estudio de la accesibilidad, tanto a nivel de volumen de datos y metodologías de cálculos como de análisis.

En este primer bloque también se comentarán aspectos relacionados con la generación de los escenarios de comparación y las consecuencias de sus posibles interpretaciones, necesario para el apartado de análisis de los casos de estudio. Finalmente, se presentan las principales características y detalles de las bases de datos usadas y la metodología empleada a lo largo de la tesis, tanto los principios generales como las variaciones aplicadas razonadamente en cada uno de los casos de estudio.

El segundo bloque está formado por la exposición de cinco casos de estudio que conforman el cuerpo principal de la investigación de la tesis, se presentan en cinco artículos en revistas internacionales, de los cuales cuatro han sido publicados dentro de los últimos 5 años y uno está en revisión en el momento del cierre de esta tesis. Todos los artículos han explorado los efectos de la congestión en el territorio a través de la accesibilidad en diferentes ámbitos territoriales densamente poblados de la Unión Europea.

Los objetivos de cada uno de los artículos son:

1. El primer artículo tiene como objetivos principales realizar la principal revisión bibliográfica del concepto de accesibilidad y explorar nuevas formas de incorporar el dinamismo en la componente transporte de los indicadores de accesibilidad, para poder proponer una definición de metodología general e incluir la naturaleza dinámica en la accesibilidad, mediante la aproximación adecuada, y así usarla como indicadores de medición del impacto de la congestión en el territorio a lo largo del tiempo.

Además, se valoran los aportes obtenidos con respecto a las metodologías tradicionales y se realiza una primera valoración de posibles análisis a realizar y presentación de resultados. Los ámbitos de estudio sobre los cuales se realizaron las diferentes pruebas fueron las áreas metropolitanas de Madrid (MAD) y Barcelona (BCN), ambas en España, usando la población según censo como valor de oportunidades en destino, para los miércoles.

Este artículo fue publicado en 2015 en la revista *European Transport Research Review* [JCR Transportation science and technology: 0,672 Q4, 2015] (Moya-Gómez & García-Palomares, 2015).

2. El artículo número dos tiene como objetivo profundizar en la correcta presentación de los datos dinámicos y los resultados mediante la ampliación de las técnicas usadas en el artículo anterior, así como la exploración de otras técnicas cartográficas poco usadas y el planteamiento de algunas directrices para ser efectivos en la transmisión de los resultados. De este trabajo, se presentaron dos animaciones y un poster que incluye fotogramas de los efectos de la congestión en la distribución de la accesibilidad a lo largo del día, además de otras capturas de resultados.

El ámbito de estudio que se usó en este artículo fue el área metropolitana de Londres (LON), en el Reino Unido de la Gran Bretaña e Irlanda del Norte, tomando el estado de la congestión en la red viaria para los miércoles. El valor de oportunidades volvió a ser definido como la población censada en cada zona de destino.

Este artículo fue publicado en 2017 en la revista *Journal of Maps* [JCR Geography, physical: 2,174 Q3, 2016] (Moya-Gómez & García-Palomares, 2017a).

3. El artículo tres analiza como la congestión altera la distribución de los valores de los indicadores de accesibilidad a lo largo del día en ocho áreas metropolitanas de los cinco mayores estados de la Unión Europea (EU)¹³: Londres (LON) en el Reino Unido de la Gran Bretaña e Irlanda del Norte, París (PAR) en Francia, Madrid (MAD) en España, Berlín (BER) en Alemania, Barcelona (BCN) en España, Roma (ROM) en Italia, Hamburgo (HAM) en Alemania, y Milán (MIL) en Italia.

¹³ Ordenadas de mayor a menor según la población 2006 de su gran área urbana, o *Large Urban Zone* (LUZ) en inglés (ESPON, 2014a)

Todos los cálculos se realizaron para el estado de congestión observado los miércoles. Además, este estudio realiza una comparativa de los resultados de cada área de estudio y una aproximación a la determinación de como las peculiaridades de cada área metropolitana tanto en la distribución de las oportunidades (población), las pautas del uso del tiempo agrupadas por países, véase los resultados de estudio HETUS (Eurostat, 2009), el nivel de uso de vehículo privado y la dotación de los diferentes tipos de infraestructuras viarias afectan en como el tráfico demanda el uso de cada tramo de carretera y, por lo tanto, sobre el valor de accesibilidad por carretera.

Este artículo fue publicado en 2017 en la revista *Journal of Transport Geography* [JCR Geography: 2,675 Q1, 2016] (Moya-Gómez & García-Palomares, 2017b).

4. El objeto de estudio del cuarto artículo es analizar cómo la congestión deforma espaciotemporalmente los cambios sobre la accesibilidad a puestos de trabajo en coche producidos por cambios de naturaleza relativamente estática a corto plazo relativos a la distribución y cantidad puestos de trabajos, y al cambio en la dotación en infraestructuras del transporte, para diferentes escenarios dentro del periodo de crisis económica de 2009 y 2014 en los Países Bajos, para todos los días laborables de la semana.

En este periodo, las distancias de movilidad obligada por trabajo aumentaron en un 6% (Statistics Netherlands, 2017b); por otro lado, el total de km recorridos por vehículos privados aumentó en más del 2%, representando más del 80% del tráfico, mientras que los kilómetros recorridos por furgonetas, más 13% del total, descendió más del 6%, y el de camiones, aproximadamente 2% del total de km recorridos, descendió casi el 20%¹⁴ (Statistics Netherlands, 2017c). El flujo de tráfico de los principales ejes aumentó entorno el 4,6% y ejes, como la autopista A2, lo incrementaron en un 9,5% (Statistics Netherlands, 2018).

Los resultados de este artículo permiten estimar una evaluación del rendimiento individualizado y agrupado en varias partes del día de los cambios producidos por cambios en la distribución de las oportunidades y/o en los estados de congestión sobre la distribución e intensidad de la accesibilidad, así como el efecto combinado de ambos cambios actuando a la vez. Estos resultados permiten además identificar qué cambio

¹⁴ Estos datos han sido incorporados en versiones posteriores del artículo.

es el más dominante en cada zona y sus efectos, pudiendo servir dichas conclusiones como input en posibles posteriores evaluaciones globales del cumplimiento adecuado de los objetivos planteados en las diferentes herramientas de planificación.

En esta tesis se presenta la primera versión de este artículo. Al finalizar la redacción de este documento, el artículo se encontraba en fase de contestación de los comentarios de los revisores e incorporación de las sugerencias realizadas. Se prevé su publicación en la revista *Regional Studies* [JCR Geography: 2,780 Q1, 2016] en el momento de la finalización de la redacción de la tesis (Moya-Gómez & Geurs, n.d.).

5. El último artículo que conforma la tesis tiene como objetivo estudiar cuales son los efectos que pueden medirse mediante la introducción del dinamismo espaciotemporal de las oportunidades en la estimación del rendimiento del sistema usos del suelo – transporte – sociedad a través de modificaciones adecuadas de la aproximación del indicador de accesibilidad usado en los anteriores artículos, y como la congestión distorsiona esos efectos.

En este caso, se realiza una aproximación del valor de las oportunidades en cada zona destino mediante el conteo de usuarios de Twitter durante varios meses para los martes, miércoles y jueves en Madrid (España) y sus municipios colindantes. Este conteo temporalizado se considera una aproximación de los movimientos de las personas a lo largo del día por el ámbito de estudio. El resultado permite comparar los efectos de deformación de la accesibilidad que cada componente dinámica tiene en el territorio, su variabilidad, y medir hasta qué grado dichas componentes pueden tener efectos aditivos o contra actuantes en cada momento del día. Estos resultados permiten evaluar la posibilidad de aplicar políticas de localización de servicios que requieran disponer adecuado acceso a la población teniendo en cuenta sus desplazamientos y el tiempo de acceso a ellos.

Este artículo fue publicado en la revista *Networks and Spatial Economics* [JCR Transportation science and technology: 2,662 Q2, 2016] en 2017 (Moya-Gómez, Salas-Olmedo, García-Palomares, & Gutiérrez, 2017).

En la Figura 1.6 se puede ver la relación de cada artículo con los objetivos específicos y preguntas de investigación planteadas en esta tesis.

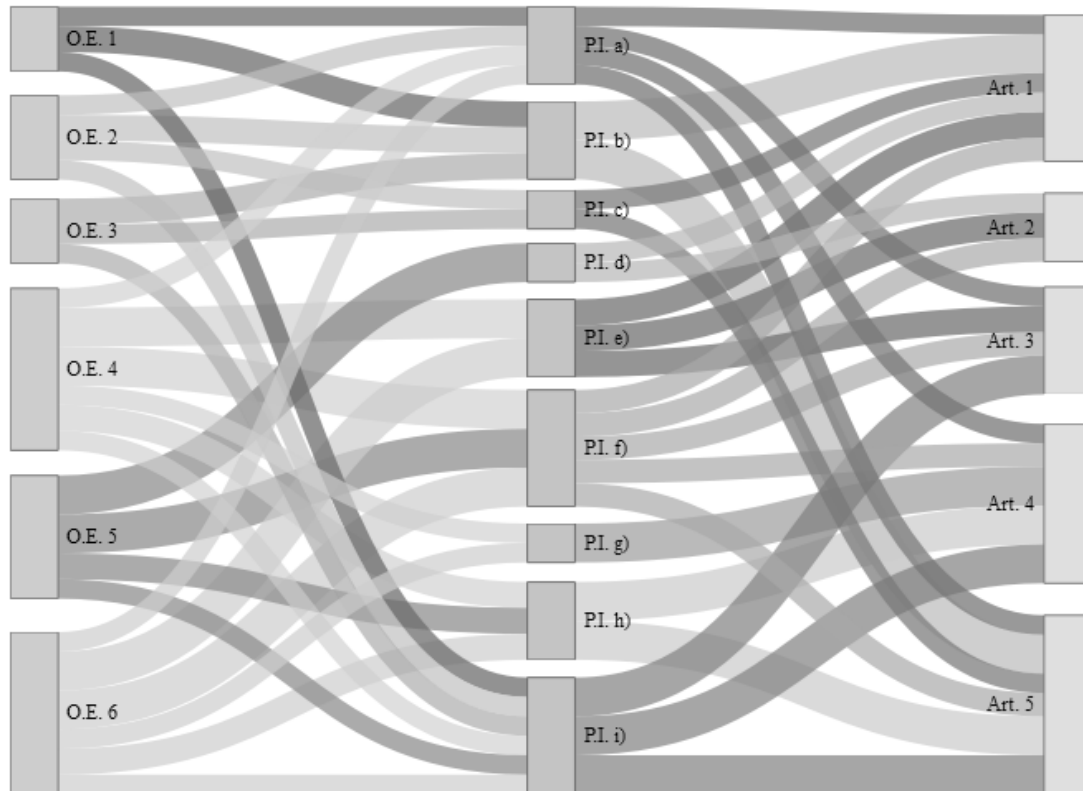


Figura 1.6. Relación de cada Objetivo Específico (O.E.) con cada pregunta de investigación (P.I.) y con cada artículo (Art.). El grosor de línea solo se usa para garantizar que el flujo ocupa todo el lado del nodo intermedio.

El tercer bloque está formado por las conclusiones que se pueden extraer del estudio conjunto de los artículos, ofreciendo una posible respuesta a las diferentes preguntas de investigación que se han formulado. Del mismo modo que se exponen propuestas de futuras investigaciones que no han podido ser llevadas a cabo en la tesis, pero que permitirían ampliar el conocimiento de la afectación de la congestión en las redes de transporte en el sistema usos del suelo – transporte – sociedad.

Finalmente, se presenta la sección de bibliografía con las referencias citadas en los tres bloques y de tres Anexos, siendo el primer Anexo una colección de fichas definitorias de cada ámbito de estudio, el segundo es el listado de posibles *funciones de disuasión según impedancia*, *impedance decay functions* o *impedance deterrence functions* en inglés, usadas o propuestas en varios trabajos de investigación o profesionales, y el tercero explica con más

detalle las principales herramientas y módulos creados y/o usados para el pretratamiento de datos, obtención de valores y análisis de los resultados.

La tesis está escrita en castellano (el resumen, los agradecimientos, el primer bloque, el tercer bloque, y los Anexos) y en inglés (la versión en inglés del resumen, el segundo bloque, y la versión en inglés del tercer bloque). Nótese que, de ésta manera, la tesis cumple los requisitos relacionados con el documento de la tesis dispuestos en el artículo 15 del Real Decreto 99/2011, que regula el programa de doctorado de esta tesis, para la obtención de la mención internacional en el título de Doctor.

Aviso: En caso de alguna discrepancia entre la versión en castellano y la versión en inglés del resumen y del tercer bloque, prevalecerá el redactado de la versión en castellano.

Notice: Only the Spanish version of the Abstract and Section 3 shall be authentic and shall prevail, in case of inconsistency, over the English version.

1.3. Marco teórico y estado del arte

En esta sección, se presenta el marco teórico de los principales conceptos que se relacionan en esta tesis para la evaluación del impacto y las consecuencias de la congestión de las infraestructuras del transporte en el sistema usos del suelo – transporte – sociedad desde una perspectiva del transporte por carretera. Por un lado, se explica el concepto de accesibilidad, el papel que juega cada una de sus diferentes componentes en su estimación, y la relación que existe entre accesibilidad y movilidad. Por otro lado, se exponen los retos que supone introducir el cambio dinámico a lo largo del periodo de estudio de los valores de las componentes de la accesibilidad y de las oportunidades que pueden surgir como, por ejemplo, el ser una herramienta para la ayuda de la planificación en la gestión de la congestión. Finalmente, se introducen los conceptos del estudio del tráfico y de cómo éste puede llegar a generar congestión, así como sus consecuencias al propio tráfico y hacia el resto de componentes del sistema.

En esta sección también se explican algunas consideraciones a tener en cuenta para prevenir de interpretaciones sesgadas de los resultados, no sólo de esta tesis sino también de cualquier otro estudio del impacto de la congestión de tráfico en la accesibilidad.

1.3.1. La accesibilidad

La accesibilidad es un concepto que permite obtener medidas del potencial de interacción resultante del sistema usos del suelo – transporte – sociedad de manera holística, que ha sido usado para entender multitud de fenómenos en los que interviene, de una manera u otra, la interacción espaciales; fenómenos como la movilidad diaria, el desempleo, el consumo energético del transporte, o el precio de viviendas u oficinas, entre otros (Dodson & Sipe, 2008; Geurs & Ritsema van Eck, 2001; Helling, 1998).

El concepto de accesibilidad ha sido objeto de varios intentos de definición entre los que se pueden destacar las propuestas de Paez, Scott y Morency (2012), que definen la accesibilidad *“como el potencial para alcanzar las oportunidades espacialmente distribuidas (para empleo, ocio, interacción social...)”*¹⁵ de Geurs y van Wee (2001), que la define como *“la extensión por la cual el sistema de usos del suelo/transporte permite a –grupos de– individuos o bienes*

¹⁵ Cita original: *“as the potential for reaching spatially distributed opportunities (for employment, recreation, social interaction, etc.)”*

*alcanzar actividades o destino por medio de modos de transporte o combinación de ellos*¹⁶ o de Morris, Dumble, y Wigan (1979) cuya definición es “*la facilidad con las que las actividades pueden ser alcanzadas, dadas una localización y usando un sistema de transportes específico*”¹⁷. Otra de las definiciones más usada es la propuesta por Hansen (1959), Breheny (1978), y Bruinsma y Rietveld (1998), quienes definen la accesibilidad como “*la facilidad de interacción con un número significativo de oportunidades*”¹⁸.

Este concepto, se puede expresar en forma de indicador, cuyas diferentes formulaciones y definición de componentes son objeto de las subsecciones siguientes de la tesis. Este indicador ha sido usado para determinar los valores de potencial de oportunidades o servicios disponibles tanto para individuos como en zonas y valorar el porqué de dichos valores. Del mismo modo, se pueden entender estos valores desde una perspectiva *normativa*, o de valores esperados, o *positiva*, o de valores percibidos (Páez et al., 2012) tanto para el conjunto de la medida como para sus componentes. Las diferencias entre medidas de accesibilidad *normativas* y *positivas* permiten orientar y plantear soluciones en planes estratégicos.

En las siguientes subsecciones, se profundiza en cómo se ha formulado el concepto de accesibilidad en un indicador, definición de las componentes, y en cuáles son las relaciones y las diferencias entre accesibilidad y movilidad.

1.3.1.1. Las cuatro componentes de la accesibilidad

El concepto de accesibilidad puede ser expresado matemáticamente en su versión más general como una función de los cuatro componentes que, a nivel teórico, participan en su evaluación (Ec. 1.1): la componente usos del suelo, la componente transporte, la componente de condiciones de los individuos, y la componente tiempo o temporal.

$$a = g(\text{transporte}, \text{usos del suelo}, \text{individuo}, \text{tiempo}) \quad \text{Ec. 1.1}$$

En donde, a representa el vector resultado con los valores de accesibilidad, y $g(\text{usos del suelo}, \text{transporte}, \text{individuo}, \text{tiempo})$ es la definición genérica de función de accesibilidad.

¹⁶ Cita original: “*the extent to which the land use/transport system enables (groups of) individuals or goods to reach activities or destinations by means of a (combination of) transport(s) mode(s)*”

¹⁷ Cita original: “*the ease with which activities can be reached, given a location, using a specific transport system*”

¹⁸ Cita original: “*the ease of interaction with a significant number of opportunities*”

La componente *transporte*, que ha sido considerada como la principal componente de la accesibilidad puesto a que es su principal resultado (Schürmann, Wegener, & Fürst, 1999), está relacionada con la facilidad con la que los individuos se pueden mover para alcanzar las diferentes oportunidades, el valor de impedancia. La modelización de esta componente ha evolucionado a medida que las nuevas tecnologías permitían afrontar mayores retos de computación.

En la literatura, se ha propuesto el uso de diferentes procedimientos para determinar el cálculo de la ruta representativa de la cada relación y obtener el valor de la impedancia: desde el cálculo directo de distancias Manhattan o euclidianas (S Hanson & Schwab, 1987) o el uso de algoritmos de búsqueda de caminos mínimos como por ejemplo Dijkstra (1959)¹⁹, con la pertinente definición de los sentidos de circulación autorizados de cada arco y giros, o el minimizar el movimiento angular, véase la teoría de Space Syntax (Batty, 2004) y su posible aplicación en rutas y accesibilidad (Charalambous & Mavridou, 2012). Algunos estudios se usan varias distancias para calcular la accesibilidad desde las diferentes perspectivas de distancias (Laatikainen, Tenkanen, Kyttä, & Toivonen, 2015; Vale, Saraiva, & Pereira, 2015).

El resultado de esta componente se suele expresar en unidades de tiempo total de viaje, pudiendo incluir tiempos de espera, de enlace, u otros tiempos extras como de acceso al medio de transporte en estudio o de aparcamiento (por ejemplo, como se propone en la Ecuación 1.2), e incluir diferentes valorizaciones de los tiempos según a la etapa del viaje que corresponden. También se pueden expresar en unidades de coste monetario para realizar el viaje: gasolina, billetes, peajes, mantenimiento del vehículo..., o mediante el coste generalizado del transporte que tiene en cuenta a los tiempos de viaje, los costes monetarios pertinentes y otros criterios como son el confort o la seguridad bajo una misma unidad.

$$c_{ij} = \frac{1}{2}\dot{c}_{ii} + \dot{c}_{ij} + \frac{1}{2}\dot{c}_{jj} \quad \text{Ec. 1.2}$$

En donde, c_{ij} es el valor de la impedancia total para ir de la zona i -ésima a la zona j -ésima, \dot{c}_{ii} es el valor de la impedancia interna de la zona i -ésima, \dot{c}_{ij} es el valor de la impedancia de la parte interzonal de la relación de la zona i -ésima a la zona j -ésima., y \dot{c}_{jj} es el valor de la impedancia interna de la zona j -ésima.

¹⁹ Complejidad $O(\text{número de arcos} + \text{número de nodos} * \log(\text{número de nodos}))$

El resultado de la componente *transporte* también puede verse influida por la definición de las zonas de agregación de la componente *usos del suelo* (Stępniaak & Jacobs-Crisioni, 2017). Cada zona (polígono) se suelen agregar a un punto, llamado centroide, el cual se considera que concentra espacialmente toda la información de la zona. La determinación de este punto puede ser el centroide del polígono, con la posibilidad o no de que este esté fuera del polígono, o la obtención del centro de masas (con ponderación).

La localización del centroide puede modificar el valor de los resultados, puesto que este punto se conecta a la red de transportes según algunos criterios, por ejemplo, al punto de la red más cercano. También hay que especificar como calcular correctamente la parte de los tiempos internos (\dot{c}_{ii} y \dot{c}_{jj} de la Ecuación 1.2) que está asociada a que los centroides de cada zona no tienen por qué corresponder con el inicio o final real de todos los viajes que se realizan entre esas zonas, y al hecho que los viajes intrazonales no tiene que tener una impedancia nula.

La componente *usos del suelo* es la componente que recoge la distribución espacial e intensidad de las diferentes oportunidades disponibles y de la localización de los interesados en interactuar con ellos. Entre los valores de interés que se han usado en estudios anteriores se puede encontrar a la población (Holl, 2007; Kotavaara, Antikainen, & Rusanen, 2011; Klaus Spiekermann & Wegener, 1996), los puestos de trabajo (Bederman & Adams, 1974; D. M. Levinson, 1998), a servicios públicos como pueden ser los centros sanitarios (Neutens, 2015), zonas verdes y parques (Reyes, Páez, & Morency, 2014; Talen & Anselin, 1998), áreas comerciales y supermercados (Farber, Morang, & Widener, 2014; Guy, 1987), o el producto interior bruto (Gutiérrez & Urbano, 1996; K Spiekermann & Wegener, 2006), entre otros.

Esta componente está influenciada por el grado de agregación espacial de los datos que se disponen, pudiendo ser totalmente desagregada (coordenadas X e Y) o agregadas según las delimitaciones administrativas pertinentes (barrio, distrito, municipios, provincias, regiones o países)²⁰, delimitaciones funcionales (por ejemplo, códigos postales o definición de áreas metropolitanas²¹), según delimitaciones con base estadística (zonas de transportes o secciones censales) u otras delimitaciones según diferentes tipos de teselaciones regulares (malla cuadrada o malla hexagonal, entre otras).

²⁰ En terminología de Eurostat, los municipios y agregaciones de municipios pertenecen a lo que se llama Unidades Locales Administrativas, o *Local Administrative Units* (LAU) (Eurostat, 2011), y las provincias, regiones, agrupaciones de regiones y países a la Nomenclatura de las Unidades Territoriales Estadísticas, o *Nomenclature des Unités Territoriales Statiques* (NUTS) (ESPON, 2014b). La relación entre las divisiones administrativas y estas unidades son diferentes para cada país (Eurostat, 2016b).

²¹ Algunos ejemplos de cómo definir zonas metropolitanas a nivel europeo se encuentran en proyectos ESPON (ESPON, 2014a)

La definición de zonas dentro del área de estudio conlleva a la aparición del problema conocido como Problema de la Unidad Espacial Modificable (ESPON, 2006; Kwan & Weber, 2008; Openshaw & Taylor, 1981), o *Modifiable Areal Unit Problem* (MAUP) en inglés, el cual se puede definir como que los datos y resultados son dependientes de cómo se definen de los límites de cada zona y del tamaño de la zona: cambiando las zonas, los resultados pueden variar.

La delimitación del área de estudio también tiene efectos sobre los valores de la accesibilidad, tanto a nivel agregado como desagregado, puesto que influye en la necesidad de definir como se contabilizan las oportunidades que no pertenecen al área de estudio pero que son accesibles desde algunas de las zonas del área de estudio. El no incluirlas ocasiona el llamado “efecto de borde”, el cual se muestra como en los valores de los individuos o zonas más cercanos al borde del área de estudio es significativamente inferiores a otros en situaciones similares. Este efecto se puede mitigar considerando en el análisis de accesibilidad también las zonas externas al área de estudio. En el caso que el área de estudio sea un país, se puede imponer algún tipo de penalización por cruzar fronteras como por ejemplo en Salas-Olmedo, García y Gutiérrez (2015).

La componente *individual* intenta caracterizar el hecho de que no todos los individuos tienen la misma probabilidad de interactuar con las oportunidades que están espacialmente distribuidas, ya sea debido a las diferencias en las necesidades, capacidades, dificultades y oportunidades que presentan.

Cada individuo tiene una serie de características como son su edad, género, color de piel, credo, estado civil, unidad familiar, número de hijos, nivel educacional, sector económico de su trabajo, ingresos, actividades programadas, coches en propiedad o la relación de propiedad de su vivienda habitual, por citar algunos de ellos (Lucas, Van Wee, & Maat, 2016; Silva, 2013), que puede afectar al valor de accesibilidad: por ejemplo, el hecho de no disponer de vehículo propio o la pertenencia al grupo de personas con movilidad reducida afecta a su valor de accesibilidad, o también desde la posible existencia de barreras de interacción de las oportunidades por no cumplir una serie de requisitos, como por ejemplo tener la titulación necesaria para poder optar a según qué tipo de trabajos.

En el caso de estudios por zonas, se presupone que todos los individuos de una zona tienen la misma caracterización, la cual puede ser obtenida de diversas fuentes oficiales como son los censos. Este tipo de agregación las interpretaciones de los resultados deben tener en

cuenta los posibles efectos relacionados con la falacia ecológica en la obtención de resultados y conclusiones (Selvin, 1958).

Nótese además que la componente individual también afecta a la medida en cómo cada individuo puede superar la distancia entre oportunidades, la cual puede definirse por *la función de disuasión según impedancia*, de la que se habla con más detalle en secciones posteriores.

La componente *temporal* está implícita en cada una de las componentes anteriores. Esta componente puede abarcar desde periodos de tiempos muy largos en los que interesa ver las consecuencias de algunas actuaciones estratégicas y el desarrollo de dinámicas en materia de distribución de oportunidades, población y de tiempos de viajes, o periodos de tiempos más cortos, como por ejemplo los relacionados con estudios de accesibilidad diaria relacionados con congestión u horarios de apertura de servicios. El estudio de la accesibilidad en periodos de tiempo cortos, a nivel de día, es parte del objetivo de esta tesis.

La definición de la accesibilidad en estas cuatro componentes permite generar multitud de escenarios que pueden ser reales, esperados o completamente ficticios, y que son la base de gran parte de estudios de accesibilidad. Mediante la comparación de los resultados de los diferentes escenarios, se puede estimar el efecto directo de los posibles cambios de las componentes con respecto a los valores del escenario de referencia, si solo cambia una componente, o de sus efectos con interacciones al cambiar más componentes, tanto a nivel de valor puntual como de distribución de la intensidad de dichos efectos en el territorio.

El uso de escenarios es la base de las estrategias de análisis denominada *y si...*, o *what if...* en inglés, siendo usado para determinar la distribución los efectos *Spillover* de las componentes, como por ejemplo los relacionados con nuevas infraestructuras (Condeço-Melhorado, Martín, & Gutiérrez, 2011), por ejemplo.

1.3.1.2. Las medidas de la accesibilidad

La accesibilidad, de la misma manera que no tiene una definición única, tampoco presenta una única metodología para su cálculo para la obtención de una medida racional. En consecuencia, se han propuesto una multitud de fórmulas que pueden estimar el valor de la accesibilidad, siendo todas válidas en la medida que pueden explicar el fenómeno de potencial de relación que todas las definiciones contienen.

Al igual que medidas de otras disciplinas, todas las propuestas para medir la accesibilidad deben, en la medida de lo posible, no sólo explicar correctamente el fenómeno, *soundness*, sino también ser de relativa facilidad de obtener/calcular y sobretodo de comunicar, *plainness* (Bertolini, le Clercq, & Kapoen, 2005). También es importante destacar que la elección de un tipo de indicador y no otros puede ser consecuencia no sólo del tipo de estudio que se esté estudiando, sino también de la disponibilidad de datos necesarios para obtener los resultados (Gutiérrez, 2001), y que el uso de varios indicadores de accesibilidad enriquecen los resultados y permiten descifrar mejor este concepto.

En el año 1976, Weibull (1976) intentó establecer los axiomas de la accesibilidad, que el autor llamó medidas de atracción-accesibilidad, o *Attraction-accessibility Measures* en inglés. Los seis axiomas propuestos son:

1. El orden en cómo se listan las oportunidades y sus impedancias con respecto a otra oportunidad o zona no afecta al valor de la accesibilidad. (Ec. 1.3)

$$a_i = g([\langle d_1, c_{i1} \rangle, \dots, \langle d_n, c_{in} \rangle]) = g([\langle d_n, c_{in} \rangle, \langle d_1, c_{i1} \rangle, \dots]) = \dots \quad \text{Ec. 1.3}$$

2. El valor de la accesibilidad debe no debe aumentar si aumenta la impedancia para un valor fijo de oportunidades, y no debe disminuir si aumenta el valor de las oportunidades en destino para una impedancia invariable. (Ec. 1.4)

$$\begin{aligned} a_i(\langle d_j, c_{ij} \rangle) &> a_i(\langle d_j, c'_{ij} \rangle), \quad \text{si } c_{ij} < c'_{ij} \\ a_i(\langle d_j, c_{ij} \rangle) &> a_i(\langle d'_j, c_{ij} \rangle), \quad \text{si } d_j > d'_j \end{aligned} \quad \text{Ec. 1.4}$$

3. Se debe garantizar que el valor de la accesibilidad para impedancia cero forme parte de la función continua en relación con la impedancia y que, a mayor número de oportunidades a impedancia cero, mayor sea el valor de accesibilidad (Ec. 1.5).

$$a_i = g(\langle d_j, 0 \rangle) \text{ es continua y creciente} \quad \text{Ec. 1.5}$$

4. El valor de accesibilidad que ofrecen todos los destinos con oportunidades con una impedancia superior a cero debe ser inferior al que se pudiese obtener si existiese un destino a impedancia cero con infinitas oportunidades (Ec. 1.6).

$$a_i = g([\langle d_1, c_{i1} \rangle, \langle d_2, c_{i2} \rangle, \dots]) < \lim_{d \rightarrow \infty} g(\langle d, 0 \rangle), \forall [\langle d_1, c_{i1} \rangle, \langle d_2, c_{i2} \rangle, \dots] \quad \text{Ec. 1.6}$$

5. Los destinos sin oportunidades no aportan ningún valor a la medida de la accesibilidad (Ec. 1.7).

$$a_i = g(\langle 0, c_{ik} \rangle) = 0$$

$$a_i = g([\langle d_j, c_{ij} \rangle, \langle 0, c_{ik} \rangle]) = g(\langle d_j, c_{ij} \rangle), \forall \langle d_j, c_{ij} \rangle \quad \text{Ec. 1.7}$$

6. Si dos destinos ofrecen el mismo valor de accesibilidad, da igual el orden de su unión, ya que el valor de la unión será el mismo (Ec. 1.8).

$$g(\langle d_j, c_{ij} \rangle) = g(\langle d_k, c_{ik} \rangle) \Rightarrow g(\langle d_j, c_{ij} \rangle \cup \langle d_k, c_{ik} \rangle) = g(\langle d_k, c_{ik} \rangle \cup \langle d_j, c_{ij} \rangle) \quad \text{Ec. 1.8}$$

En donde²², a_i es el valor de la accesibilidad para la zona i -ésima, d_j es el valor de las oportunidades en la zona j -ésima, c_{ij} es la impedancia para ir de la zona i -ésima a la zona j -ésima.

En la literatura se han propuesto varias formas de clasificar los diferentes indicadores de accesibilidad, exponiendo a continuación los puntos fuertes y débiles de cada una de estas propuestas, así como el tipo de estudios en los cuales se suelen utilizar. Algunas clasificaciones son las propuestas por Bruinsma y Rietveld (1998), Curl, Nelson y Anable (2011), Geurs y Van Wee (2004), Helling (1998), Morris et al. (1979), Páez et al. (2012), y Pirie (1979), entre otros. Sin embargo, en esta tesis se decide presentar el abanico de principales indicadores de accesibilidad según la clasificación propuesta por Geurs y Ritsema van Eck (2001):

- Indicadores de accesibilidad basados en *infraestructuras*. Este grupo engloba todos aquellos indicadores que hacen únicamente referencia a la componente del transporte y que hacen referencia a cada zona del área de estudio. Estos suelen medir la calidad del rendimiento de la red de transporte, ya sea mediante la estimación de velocidades medias, de *niveles de servicios* o *level of service (LOS)* en inglés (TRB, 2000), o tiempos de viajes para cada zona de transporte en diferentes momentos del día.

En esta categoría también se incluyen los indicadores explicativos de la dotación de infraestructuras (Izquierdo de Bartolomé & Monzón de Cáceres, 1992) como son los de presencia o ausencia de modos de transportes, la densidad de cada tipo de infraestructura por área o población y la relación entre el rendimiento real comparado con una red cuyas conexiones se expresan mediante la distancia euclidiana, y los

²² Véase nota al pie número 1 (en Lista de símbolos)

indicadores de evaluación de conectividad con la red en cada zona como, por ejemplo, el indicador ICON (Turró & Ulled, 1990).

Las medidas de este grupo, suelen ser usadas en estudios de planificación del transporte. La mayor limitación de estos indicadores es que omiten las componentes *usos del suelo* e *individual* para la obtención de resultados.

- Indicadores de accesibilidad basados en *la localización de actividades*. Este tipo de medidas incorpora de manera explícita la localización de las diferentes actividades con las se puede interactuar. Estos indicadores, se pueden dividir en dos grandes bloques, según si se el resultado hace referencia a las zonas del área de estudio (estudio macro), o si hace referencia a los individuos (estudio micro).
 - Los indicadores que hacen referencia a los valores de cada zona (indicadores zonales) del área de estudio se calculan en base a la siguiente ecuación (Ec. 1.9). Estos son estudios a nivel *meso* y suelen ser del tipo estático, es decir, que las componentes son constantes para cada escenario de cálculo.

$$a_i = \sum_{j \in N} d_j \cdot f(c_{ij}, \theta) \quad \text{Ec. 1.9}$$

En donde, $f(c_{ij}, \theta)$ es una componente función que corresponde a la función que pondera la posibilidad de interacción o conteo de oportunidades según la impedancia anterior, y θ son los parámetros que definen la función. N es el conjunto de zonas dentro de la zona de estudio, en la que se encuentran tanto la zona i -ésima como j -ésima. Nótese como no se impide que la zona i -ésima sea igual a la zona j -ésima (viajes intrazonales).

Este tipo de indicadores asume que el valor de accesibilidad es idéntico para todos los interesados en interactuar de la zona i -ésima. Tradicionalmente se ha dividido en dos grandes grupos estas medidas de accesibilidad, según la forma de la función que pondera la posibilidad de interacción según la impedancia:

- En un primer grupo son las *medidas de contorno*, *contour measures* en inglés, cuya parte funcional corresponde una variable binaria definida según la Ecuación 1.10. Esta medida se caracteriza por el

establecimiento de un límite, representado por θ , por el cual, cualquier actividad a menor impedancia se tiene en cuenta y si la oportunidad tiene cualquier impedancia mayor, se omite. Este tipo de medidas es altamente dependiente de la definición del límite, además de suponer que tanto las oportunidades cercanas a la zona i -ésima, como aquellas que están próximas al límite tienen el mismo potencial de interacción.

$$f(c_{ij}, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } c_{ij} < \theta \\ \{0, 1\} & \text{si } c_{ij} = \theta \\ 0 & \text{si } c_{ij} > \theta \end{cases} \quad \text{Ec. 1.10}$$

Sin embargo, este tipo de medidas es fácilmente interpretable ya que indica cuantas oportunidades hay en cada zona a una impedancia menor que, o menor o igual que, una impedancia límite²³. Nótese que esta medida puede cumplir con el segundo axioma de Weibull si se considera opera con el resultado de la función dicotomía de la Ecuación 1.10, en función de la impedancia.

Algunos trabajos que han usado este tipo de medidas son Bertolini et al. (2005), Casas (2003), Hanson (1982), Levinson et al. (2017), Martin, Jordan, y Roderick (2008), Rojas, Páez, Barbosa, y Carrasco (2016) o Straatemeier (2008), entre otros.

- El otro grupo de medidas zonales basadas en la localización de actividades son las llamadas medidas de *accesibilidad potencial*, *potential accessibility* en inglés.

En este caso, la que la componente funcional está definida por una función²⁴ que pondera el peso de las oportunidades de la zona j -ésima en función de la impedancia con respecto a la zona i -ésima. Esta función se llamada *función de disuasión según impedancia*, *impedance decay function* o *impedance deterrence function* entre otros términos²⁵ en inglés, y de la que se habla con mayor detalle en la sección 1.3.1.4.

²³ Obsérvese como este tipo de medida no puede cumplir el axioma 2 de Weibull si no se hubiese realizado la modificación de dicho axioma realizada en la presente tesis.

²⁴ Esta función debe ser monótona decreciente para cumplir el axioma 2 de Weibull, también en su versión original.

²⁵ En la literatura, se encuentran otros nombres como *distance decay function* (Iacono et al., 2008; L. Miguel Martínez & Viegas, 2013), *deterrence function* (Ortúzar & Willumsen, 2011), *impedance function* (Handy & Niemeier, 1997; Reggiani, Bucci, & Russo, 2011a), entre otros. Sin embargo, el autor de esta tesis doctoral considera adecuado desligar el nombre de esta función del tipo de impedancia que se usa.

Este indicador se popularizó tras su definición por Hansen (1959), que se inspira el principio de la ley de la gravitación universal de Newton (1687).

A diferencia de la anterior medida, este tipo de medidas elimina la dependencia a la definición casi arbitraria del límite y puede incorporar correctamente la primera ley de la geografía (Tobler, 1970): *“Todo está relacionado con todo, pero lo que está más cercano está más relacionado que lo que está más distante”*²⁶. Sin embargo, el resultado de los valores de accesibilidad potencial es un poco más difícil de entender ya que éste representa el valor percibido de las oportunidades según la ponderación de posibilidades de interacción, o el número de oportunidades equivalentes que se obtendría de poder concentrarlas correctamente en la zona *i*-ésima.

Estas medidas son ampliamente usadas en gran parte de estudios de accesibilidad, como por ejemplo en Bederman y Adams (1974), Geurs y Van Wee (2006), Lotfi y Koohsari (2009), Reggiani, Bucci, & Russo (2011b), Rosik, Stepniak, & Komornicki (2015), Vickerman (1974), o Zhu & Liu (2004). Uno de los motivos es la versatilidad que ofrece la definición de diferentes *funciones de disuasión según impedancia*. En la literatura de accesibilidad a mercados, suele llamarse unidades potenciales de mercado, o *Market Potential Units (MPUs)* en inglés. Estas medidas cumplen los axiomas de Weibull si la *función de disuasión según impedancia* es monótona decreciente²⁷.

Nótese que estudios como Geertman & Ritsema Van Eck (1995), Gutiérrez (2001), Karou y Hull (2014), o Martínez Sánchez-Mateos, Mohíno Sanz, Ureña Francés, y Trapero Solís (2014) usan tanto las medidas de accesibilidad *potencial* y de *contorno* para estudiar los cambios de las componentes en los valores de accesibilidad.

- Los indicadores basados en la localización de las actividades también pueden ser analizados desde un punto de vista individual o *micro*. Este tipo de medidas

²⁶ Cita original: “Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things”

²⁷ Véase apartado 1.3.1.4

se fundamentan en el marco teórico de geografía espacio-temporal propuesta por Hägerstrand (1970).

Estos indicadores se basan en la determinación del *Prisma Espacio-Temporal*, o *Space-Time Prisms (STP)* como se les conoce en inglés, generado por la localización inicial de cada individuo r -ésimo, su agenda y el tiempo mínimo requerido para realizar diferentes actividades disponibles, tanto si va a participar en ellas, como si no lo hace, dentro de un espacio de tres dimensiones por el cual se mueve un móvil que representa al individuo r -ésimo en estudio.

Dos de las dimensiones hacen referencia al espacio físico en el que se encuentran las actividades y las redes de transporte disponibles para acceder a cada actividad. La tercera dimensión, el cual es el vector normal del plano de formado por las otras dos dimensiones, representa el tiempo. Como resultado del movimiento del potencial movimiento del móvil- individuo r -ésimo a lo largo del periodo de estudio, se obtiene el *prisma espacio-temporal* requerido para el estudio de su nivel de accesibilidad (Figura 1.7). Cuando un individuo se encuentra realizando una actividad, la línea que representa su trayectoria espacio-temporal es vertical, mientras que cuando requiere hacer un desplazamiento, ésta forma un ángulo agudo con el plano paralelo al espacial para un momento determinado del desplazamiento, por ejemplo, el inicio del mismo, y cuyo valor representa la velocidad de movimiento: cuando su valor sea más cercano a cero, mayor velocidad de desplazamiento (Miller, 1991; Miller & Bridwell, 2009).

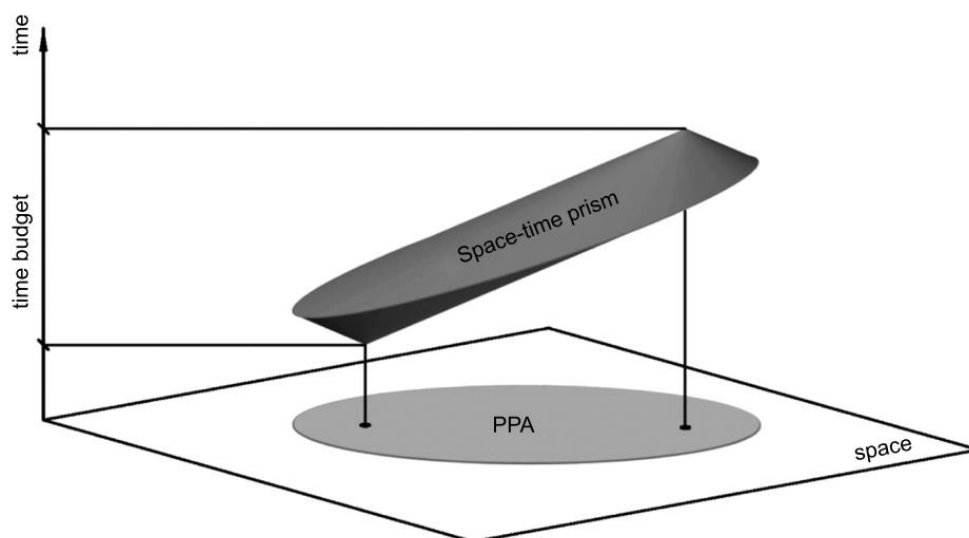


Figura 1.7: Esquema de los prismas espacio-temporales. Fuente: Neutens, Schwanen, y Witlox (2011).

Nótese como el móvil-individuo tiene un alto nivel de movilidad en la dimensión espacial, estando limitado por la topología de la red, pero sobre el que se puede volver a un punto anteriormente visitado, pero no así en el eje del tiempo, puesto a que no puede retroceder en el tiempo.

La proyección del *prisma espacio-temporal* resultante de todas las actividades a las que puede llegar y realizar satisfactoriamente un individuo dado un tiempo disponible entre dos actividades programadas sobre el plano espacial da lugar a lo que se conoce como *Área de Caminos Potenciales*, o *Potential Path Area (PPA)* (Lenntorp, 1976) en inglés. El resultado se puede asimilar a la que se obtiene en las *medidas de contorno* anteriormente explicadas, aunque en este caso tiene en cuenta la agenda del individuo en estudio. Estas medidas se han usado en Fransen, Farber, Deruyter, y De Maeyer (2017), Hall (Hall, 1983), Islam, Rahaman, y Ahmed (2008), Kwan (1999), y (2003), entre otros.

Las medidas basadas en los prismas espacio-temporales, aunque son una forma de incorporar explícitamente la componente personal y gran parte de los parámetros de la componente temporal de la accesibilidad, representa una serie de inconvenientes a tener en cuenta.

Desde el punto de cálculo del *prisma espacio-temporal*, este requiere de una gran cantidad de datos para poder ser calculado, desde las agendas de los individuos hasta los horarios de cada actividad. Una forma de conseguir estos datos, de manera directa o indirecta, es mediante las oportunidades que ofrece el Big Data, como se propone en Chen et al. (2018), por ejemplo. Además, se debe generar un o varios prismas para cada individuo r -ésimo y se debe realizar su proyección para poder estimar el ámbito espacial del que dispone para realizar actividades. Esto supone también una gran cantidad de resultados a generar que por sí solos representan los valores de accesibilidad de cada individuo r -ésimo (a_r) pero que se suelen agregar de alguna manera para garantizar el anonimato de cada individuo del estudio, evitar el sesgo de la muestra, y el poder resultar útil para la planificación y en su interpretabilidad. Finalmente, pese a que los estudios anteriores han basado la transformación de PPA a accesibilidad en *medidas de contorno*, fácilmente se podría incorporar el concepto de *accesibilidad potencial* en ellas.

- Indicadores de accesibilidad basados en *la teoría de la utilidad* de microeconomía. Este tipo de indicadores estiman la utilidad, representada en la Ecuación 1.11 en su versión más general, que cada individuo r -ésimo estima obtener al elegir cada opción según las características de la actividad, de la red de transporte y las capacidades del individuo (R. J. Sweet, 1997) a partir del cual se determina el valor de la accesibilidad. En Johansson, Klaesson, y Olsson (2002) se expresa la relación entre los modelos de utilidad y los de accesibilidad potencial.

$$v_{rl} = v_{rl} + \varepsilon$$

s.t:

Ec. 1.11

$$v_{rl} = \alpha_l + \sum_{x \in X} \beta_x \cdot p_{xrl} + \sum_{y \in Y} \delta_{yl} \cdot p_{yrl} + \sum_{z \in Z} \gamma_{zl} \cdot p_{zr}$$

En donde, v_{rl} es la utilidad que obtiene el individuo r -ésimo en realizar la actividad l -ésima. v_{rl} es la parte determinista de la utilidad, que está compuesta por α_l que representa la constante de la alternativa l -ésima, p_{xrl} es una variable del subconjunto de variables genéricas X cuyo parámetro de sensibilidad β_x es idéntico para cada alternativa (atractividad de la alternativa), p_{yrl} es una variable del subconjunto de

variables específicas de las alternativas Y cuyo parámetro de sensibilidad δ_{yl} depende de la alternativa l -ésima, y p_{zr} es una del subconjunto de variables de individuo Z cuyo parámetro de sensibilidad γ_{zl} depende de la alternativa l -ésima. Finalmente se incorpora el término aleatorio ε que hace referencia a la parte no sistemática de la utilidad, la que no puede ser incorporada en el cálculo de los valores deterministas.

La estimación de la accesibilidad usando las medidas de utilidad pueden ir desde la forma más sencilla que es asumiendo que la accesibilidad hace a la esperanza matemática de la alternativa que mayor valor de utilidad tiene de entre todas las alternativas (Ec. 1.12a) (Ben-Akiva & Lerman, 1979), o el logsum de la parte sistemática de la utilidad de todas las alternativas (Ec. 1.12b), entre otras. También se puede aplicar a un circuito de posibles actividades desde que sale a casa, hasta que vuelve (Dong, Ben-Akiva, Bowman, & Walker, 2006).

$$\begin{aligned} \text{a) } a_r &= E(\max(u_{rl})) \\ \text{b) } a_r &= \ln(\sum_{l \in L} e^{v_{rl}}) \end{aligned} \quad \text{Ec. 1.12}$$

En donde, a_r es el valor de la accesibilidad del individuo r -ésimo.

Este tipo de valores de accesibilidad tienen el principal inconveniente de que el valor resultante está expresado en unidades latentes, las cuales no pueden ser directamente observadas, con lo que su interpretabilidad es baja para aquellos que no están familiarizados con la teoría de la utilidad y la forma de cálculo de este tipo de accesibilidades.

Los indicadores de accesibilidad pueden ser medidos desde dos puntos de vista. El primero de ellos es el que se llama accesibilidad activa: se basa en la medida del potencial que tiene un individuo o zona de alcanzar las oportunidades e interactuar. Este punto de vista es el que se ha usado para la definición de los diferentes indicadores de accesibilidad en la presente sección hasta el momento. El otro punto de vista se centra en los destinos y cuantos potenciales interesados en interactuar disponen: es la accesibilidad pasiva (Cascetta, Carteni, & Montanino, 2016). En este caso, se debe sustituir el concepto de destino de la zona j -ésima por el concepto de origen de la zona i -ésima. A modo de ejemplo, la ecuación de la accesibilidad pasiva por localización de actividades zonal quedaría como se indica en la Ecuación 1.13.

$$a_j^{pas} = \sum_{i \in N} o_i \cdot f(c_{ij}, \theta) \quad \text{Ec. 1.13}$$

En donde, a_j^{pas} es el valor de la accesibilidad pasiva para la zona j -ésima, o_i es valor de los posibles usuarios de la zona i -ésima. Nótese además como la variable c_{ij} sigue expresando el tiempo de viaje que hay entre la zona origen i -ésima, con la zona destino j -ésima.

También hay que señalar que las definiciones de indicadores de accesibilidad mostradas en esta sección presuponen que la capacidad de las oportunidades en destino y/o de interesados en interactuar con ellas en cada origen es infinita y que no afecta al valor de la accesibilidad.

Sin embargo, esta premisa puede ser inadecuada para los estudios de accesibilidad a centros de salud o equipamientos educativos (McGrail & Humphreys, 2009), en los que la capacidad de interacción en destino depende de la capacidad de cada uno de los equipamientos en sistemas de asignación y limitada elección, en los estudios de ubicación de comercios, en donde el número de clientes es finito y pueden elegir otras alternativas (Ritsema van Eck & de Jong, 1999), o en los estudios de accesibilidad a empleo en que no solo la oferta de trabajos es limitada sino que el total de candidatos para ocuparlas también lo es (Geurs & Ritsema van Eck, 2003; McGrail & Humphreys, 2009). En estos casos se puede decir que existen efectos de competitividad.

Las alternativas para intentar introducir esos efectos de competitividad en las diferentes medidas se han basado en incorporar, de alguna manera, los valores de las medidas de accesibilidad pasiva como ponderadores del peso de las oportunidades en los destinos en las medidas de accesibilidad activa, y viceversa.

Este procedimiento genera una gran multitud de dependencias ente los valores que se deben usar, llegando al extremo que usuarios que nunca competirán por las mismas oportunidades ven como sus valores están relacionados por la siguiente cadena de cálculo: los valores de accesibilidad activa dependen de los valores de accesibilidad pasiva de un destino de cada destino que pueden alcanzar, los cuales, a su vez, dependen de los valores de accesibilidad activa de los posibles usuarios de cada destino.

La mayoría de métodos propuestos han limitado de alguna manera esa cadena de cálculo definiendo que se considera como competidor para un individuo de la zona i -ésima que quiere alcanzar unas oportunidades en la zona j -ésima y cuál es la relación de estos con otros

destinos que pueden alcanzar y sus respectivos competidores.

Algunas metodologías de accesibilidad con competitividad son las propuestas en Joseph & Bantock (1982), Van Wee, Hagoort y Annema (2001) y Östh (2011), Kawabata y Shen (2007) o Luo y Wang (2003) que además incluye la diferenciación de competidores según sus tiempos en transporte privado y transporte público, entre otros. Todos estos métodos permiten introducir parcialmente la competitividad ya que padecen de efectos frontera para todas las zonas del área de estudio al limitar la cadena de cálculo.

En Geurs y Ritsema van Eck (2001) se propone el uso de técnicas de balanceo basadas en los modelos de interacción espacial de Kirby (1970) y Wilson (1971) habituales de las técnicas de prognosis de la movilidad, tal y como se ve en la siguiente sección, para obtener de ellos los valores de accesibilidad con competitividad. Esta metodología permite incorporar todas las relaciones de competitividad, pero tiene un mayor coste computacional.

Las medidas de accesibilidad con competitividad, por definición, pueden no cumplir alguno de los axiomas de Weibull en su forma original, debido a que el valor percibido de la oportunidad también depende de las condiciones de competición de otros competidores.

1.3.1.3. Accesibilidad y movilidad. Dos conceptos relacionados

Un punto conceptual importante para el estudio de la accesibilidad es el entender cuál es la relación y las diferencias entre este concepto y el concepto de movilidad. Estos conceptos se consideran erróneamente equivalentes, pese a su naturaleza distinta (Handy, 2002; Hodge, 1997; Ross, 2000), lo que da lugar a errores de interpretación de los datos y resultados. La relación entre la accesibilidad y la movilidad se puede explicar mediante el uso de los fundamentos teóricos y matemáticos que desarrollan especialmente las dos categorías de indicadores de accesibilidad basados en localización de actividades y de las metodologías de estimación de la movilidad.

Quizá, la manera más visual de entender la diferencia entre la movilidad y la accesibilidad, así como su relación, es mediante el uso de los indicadores individuales o *micro* basados en los prismas espacio-temporales. Tal y como se expresa mediante la analogía del acuario (Neutens et al., 2011), la accesibilidad se puede entender como el espacio en tres dimensiones que forma un acuario, el que conforma todas las posibilidad de interacción espacio-temporal de las actividades de las que dispone el individuo *r*-ésimo en su camino

desde el fondo del acuario hasta la superficie; dicho en otras palabras, expresa todo el abanico de posibilidades que tiene ese individuo, tanto si las elige como si no lo hace.

La movilidad, por su parte, se representa en el acuario como un elemento lineal, dibujando la trayectoria empleada por el individuo r -ésimo entre las diferentes actividades de las disponibles en el acuario en lugares y tiempos diferentes que ha realizado o va a realizar. Obsérvese como la elección entre dos actividades planificadas modifica el prisma inicial, convirtiéndolo en dos que estarán completamente incluidos en el inicial.

Nótese como el concepto accesibilidad solo mide, total o parcialmente, la posibilidad de interacción con actividades espaciotemporalmente distribuidas, pero no implica explícitamente ninguna elección de actividad ni movimiento (Salomon & Mokhtarian, 1998), la elección de realizar una actividad y la necesidad de desplazamiento genera movilidad. De esta relación entre accesibilidad y movilidad, se originan los métodos de estimación de la movilidad –y de otras decisiones con componente espacial, basados en agentes/actividades (Balmer, Meister, Rieser, Nagel, & Axhausen, 2008; Raubal, Miller, & Bridwell, 2004).

Por su parte, la modelización de la movilidad y los indicadores de accesibilidad zonal, pueden mostrar su relación de manera más matemática mediante el empleo del método de la maximización de la entropía (Wilson, 1971, 2010) para la estimación de la movilidad, usado ampliamente en los estudios de movilidad basados en el método de los cuatro pasos, véase en Ortúzar y Willumsen (2011). Esta modelización de la movilidad, que se puede considerar un modelo especial del viajes general propuesto por Alonso (1978) pero que no permite considerar adecuadamente cambios en los flujos de entrada y salidas (Vries, Nijkamp, & Rietveld, 2001), es usada en algunos estudios para la obtención de los parámetros de la *función de disuasión según impedancia*.

Para entender esta relación hay que diferenciar entre los estados *micro*, los que hacen referencia a los individuos, los estados *meso*, los que hacen referencia a las zonas y los estados *macro*, los que hacen referencia al conjunto del área de estudio. También es necesario la aceptación de la siguiente premisa: *“la base para aceptar este método es que, a menos que exista información que diga lo contrario, todos los estados micro que son consistentes con los datos del estado macro tienen la misma probabilidad de ocurrir”* (Ortúzar & Willumsen, 2011, p. 185), y en identificar cuáles son los estados *meso* más probables de ocurrir dado el estado *macro*. Bajo estas premisas, los estados *meso* más probables son aquellos que pueden ser generados con el mayor número de combinaciones de estados

micro, y el cual se puede obtener de la maximización de la Ecuación 1.14, que representa la entropía.

$$\ln W = \ln \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} = \ln T! - \sum_{ij} \ln T_{ij} \cong \ln T! - \sum_{ij} T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij} \quad \text{Ec. 1.14}$$

En donde, W es el número de estados *micro* asociados a un estado *meso*, T es el total de viajes del estado *macro*, y T_{ij} es el número total del viajes entre las zonas i -ésima y j -ésima que representan un estado *meso*.

La ecuación anterior no tiene ninguna condición que restrinja los valores que pueden adoptar los estados *meso*, salvo que su valor sea mayor o igual que cero, condición implícita por la naturaleza de las variables. Es por ello que se suelen añadir las condiciones limitantes que pueden ser directamente observables del área de estudio para restringir correctamente los posibles valores de movilidad que se pueden adoptar. Entre estas condiciones encontramos aquellas que pueden ser observables en cierta medida y que aseguran que para cualquier estado *meso*, la suma de viajes cuyo origen es la zona i -ésima sea igual a la cantidad de viajes que se inician en dicha zona (Ec. 1.15a), y equivalente para destino (Ec. 1.15b). También se puede imponer otras condiciones que no son observables directamente, como la igualdad del coste total de transporte con la suma ponderada de las distintas relaciones (Ec. 1.15c).

$$\begin{aligned} a) \quad O_i - \sum_{j \in N} T_{ij} &= 0, \forall i \in N \\ b) \quad D_j - \sum_{i \in N} T_{ij} &= 0, \forall j \in N \\ c) \quad C - \sum_{i \in N, j \in N} T_{ij} \cdot h(c_{ij}) &= 0 \end{aligned} \quad \text{Ec. 1.15}$$

En donde, O_i es el total de viajes que se generan en la zona i -ésima, D_j es el total de viajes que atrae la zona j -ésima, C es el coste total del sistema de transportes, y $h(c_{ij})$ es la función del coste del transporte de cada estado *meso*.²⁸

²⁸ Para obtener una solución, la suma de los valores O_i y la suma de los valores D_j para toda el área de estudio debe ser igual.

Mediante el empleo de los multiplicadores de Lagrange, la Ecuación 1.14 con las condiciones de la Ecuación 1.15, permiten obtener el flujo de cada relación según se muestra en la Ecuación 1.16.

$$T_{ij} = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot f(c_{ij}, \theta) \quad \text{Ec. 1.16}$$

En donde, A_i es el coeficiente balanceador asociado a la inversa de oportunidades resultante de los multiplicadores de Lagrange y B_j es el coeficiente balanceador asociado a la inversa de la competitividad. Estos coeficientes, que se llaman balanceadores porque se calibran cambiando sus valores mediante el método de Furness modificado (Furness, 1965)²⁹, son los que indican la interacción espacial de cada zona según los costes y oportunidades de todas las zonas del área de estudio (Ec. 1.17).

El proceso iterativo finaliza cuando los cambios entre los vectores de los coeficientes balanceadores de la iteración actual son muy similares a los de la iteración anterior, según se haya definido, y, por lo tanto, cumple las condiciones limitantes. Otro posible motivo de parada del proceso es que se haya alcanzado el máximo de iteraciones asignado por el usuario, para evitar bucles infinitos en caso que, por la razón que fuese pudiesen ocasionarse.

Obsérvese como los dos últimos coeficientes de la Ecuación 1.17 forman parte de los indicadores de accesibilidad por localización de actividades zonales: cambios de los valores de accesibilidad de cada zona tendrán efectos en la distribución del número de viajes que se realizan entre las zonas debido a los efectos de la competición derivados a los condicionantes de la limitación del número total de viajes generales y atraídos en cada zona.

Inicialización – iteración 0:

$$A_i^0 = 1, \forall i \in N; B_j^0 = 1 \forall j \in N$$

Proceso iterativo – iteración w -ésima:

Ec. 1.17

$$A_i^w = \frac{1}{\sum_{j \in N} B_j^{w-1} \cdot D_j \cdot f(c_{ij}, \theta)}$$

²⁹ La Ecuación 1.17 también se puede usar para añadir efectos de competitividad en la accesibilidad ya que la inversa del parámetro A_i normalizado de modo que la media del coeficiente B_j sea 1 es dicho valor

$$B_i^w = \frac{1}{\sum_{i \in N} A_i^w \cdot O_i \cdot f(c_{ij}, \theta)}$$

El modelo empírico-triproporcional elimina la necesidad de conocer a priori el tipo de *función de disuasión según impedancia*, y sustituye sus valores por un conjunto de coeficientes balanceadores ζ_s para cada uno de los s -ésimo grupo que se definan según la impedancia, todos los viajes con dentro del mismo grupo tienen el mismo coeficiente ζ , independientemente del valor de la impedancia. Cada grupo está definido por las impedancias límite y por su valor medio, estos grupos pueden tener rangos iguales o pueden ser definidos por otros criterios. En consecuencia, la ecuación que estima el número de viajes entre la zona i -ésima y la zona j -ésima es la de la Ecuación 1.18, y el procedimiento iterativo para calibrar los tres conjuntos de valores balanceadores es el descrito en la Ecuación 1.19.

$$T_{ij} = A_i \cdot O_i \cdot B_j \cdot D_j \cdot \zeta_s \quad \text{Ec. 1.18}$$

En donde ζ_s es el coeficiente balanceador del grupo de impedancias s -ésimo.

Inicialización – iteración 0:

$$A_i^0 = 1, \forall i \in N; B_j^0 = 1 \forall j \in N; \zeta_s = 1 \forall s \in S$$

Proceso iterativo – iteración w -ésima:

$$A_i^w = \frac{1}{\sum_{j \in N} B_j^{w-1} \cdot D_j \cdot \zeta_s^{w-1}} \quad \text{Ec. 1.19}$$

$$B_i^w = \frac{1}{\sum_{i \in N} A_i^w \cdot O_i \cdot \zeta_s^{w-1}}$$

$$\zeta_s^w = \frac{\bar{c}_s}{\sum_{T_{ij} | c_s^{inf} \leq c_{ij} < c_s^{sup}} A_i^w \cdot O_i \cdot B_j^w \cdot D_j}, s \in S$$

En donde \bar{c}_s es el valor medio de la impedancia en el grupo s -ésimo, c_s^{inf} es el valor mínimo de la impedancia que define al grupo s -ésimo, c_s^{sup} es el valor máximo de la impedancia que define al grupo s -ésimo, y S es el conjunto de grupos predefinidos de impedancias.

Matemáticamente, el modelo de viajes de Alonso (1978), que incorpora elasticidades que

permiten introducir cambios en el total de flujos, se puede definir de manera similar a las ecuaciones, pero en que las variables O_i y D_j son endógenas. En concreto, el total de viajes de salida contabilizados en la zona i -ésima (O_i) es igual al tamaño de dicha zona multiplicado por el parámetro balanceador A_i elevado entre 0 y 1, ambos inclusive. Mismo comentario se puede hacer con el coeficiente balanceador B_j y el tamaño de la zona j -ésima de destino (D_j). En caso de elevarse ambos coeficientes a 0, se obtiene el modelo descrito en la Ecuación 1.16.

La relación entre el concepto de la accesibilidad y diferentes medidas de movilidad es aún algo controvertida puesto a que diferentes estudios reportan resultados dispares, tal y como se apunta en Cordera, Coppola, dell'Olio, y Ibeas (2017). Se debe recordar que cada indicador de accesibilidad solo puede capturar una faceta generadora de movilidad (Kwan, 1998; Thill & Kim, 2005), reconociendo que algunas pueden tener mayor impacto que otras y que la accesibilidad puede estar correlacionada con otras variables del estudio.

1.3.1.4. La probabilidad de interacción: la importancia de la *función de disuasión según impedancia*

La *función de disuasión según impedancia* es una parte fundamental en la estimación de algunas de las medidas de accesibilidad y que puede expresar algunas cualidades de la componente *individual* tanto de manera desagregada como agregada.

La *función de disuasión según impedancia* es una función de supervivencia³⁰ (Iacono, Krizek, & El-Geneidy, 2008) que expresa la probabilidad de interacción que existe con una zona destino j -ésima según la impedancia correspondiente, bajo el principio de la primera ley de la geografía (Tobler, 1970). Esta función también puede relacionarse directamente a la fricción para realizar un viaje en los modelos de estimación de viajes por modelos de interacción espacial³¹ o a la probabilidad de supervivencia de un paciente desde que se avisa a un servicio médicos de emergencia hasta que llega, especialmente para modelos de localización de bases (Erkut, Ingolfsson, & Erdoğan, 2008).

La correcta elección del tipo de función a utilizar y de cómo se calibren los parámetros correspondientes es fundamental para obtener los resultados que mejor se ajusten a la

³⁰ La función de supervivencia es la función que se obtiene de restarle a 1 el valor las correspondientes imágenes de la función acumulada para cada valor del eje de abscisas.

³¹ Véase la sección 1.3.1.3.

realidad. Cada tipo de *función de disuasión según impedancia* tiene unas propiedades de forma que las pueden hacer, a priori, más interesantes que otras para cada tipo de estudio. Este tipo de funciones cumple la condición de que a mayor distancia menor es la posibilidad de interacción, para cumplir el hecho de que los viajes cortos se pueden realizar con mayor frecuencia y menor planificación, tal y como señalan Johansson, Klaesson, y Olsson (2002).

En estudios anteriores, se ha utilizado diferentes tipos *funciones de disuasión según impedancia*, siendo las más comunes aquellas que pertenecen a las familias de funciones potenciales negativas y de funciones exponenciales negativas. En ambos casos, el comportamiento viene definido por el tipo de función que es $h(c_{ij})$ en la Ecuación 1.15c, tal y como se muestra en la Tabla 1.1.

Familia de funciones	$h(c_{ij})$	$\frac{\partial (h(c_{ij}))}{\partial (c_{ij})}$	$f(c_{ij}, \theta)$
Potencial negativa (Pareto)	$\ln(c_{ij})$	$\frac{1}{c_{ij}}$	$e^{-\theta \cdot \ln(c_{ij})} = c_{ij}^{-\theta} = \frac{1}{c_{ij}^{\theta}}$
Exponencial	c_{ij}	constante	$e^{\theta c_{ij}}$

Tabla 1.1. Definición de las principales familias de *función de disuasión según impedancia*.

La familia de las funciones potenciales negativas es adecuada para estudios interurbanos y se obtiene de la valoración de los tiempos de viaje que sigue una escala logarítmica. Esto significa que a medida que el tiempo de viaje es un valor mayor, la penalización por añadir un tiempo extra infinitesimal (derivada) se vuelve menor: la valoración del tiempo de viaje es dependiente del total del tiempo de viaje. El parámetro de esta *función de disuasión según impedancia* es consistente con la distribución *gamma*, lo que significa que los viajeros son heterogéneos con respecto a este parámetro (Fotheringham & O’Kelly, 1989).

Por el otro lado, la familia de las funciones exponenciales negativas parte de la base de que el tiempo de viaje siempre es homogéneo, es decir que penaliza el tiempo extra independientemente de cuánto tiempo ya se ha previsto emplear (Reggiani, Bucci, & Russo, 2011b). Este tipo de funciones es adecuado para estudios urbanos, en lo que cada minuto extra penaliza lo mismo.

Las familias de las funciones anteriores tienen un comportamiento demasiado marcado que puede hacer que no sean de todo adecuadas para modelizar las interacciones espaciales del área de estudio. En consecuencia, existen otros tipos de funciones que pueden superar las

limitaciones anteriores.

En la Tabla 1.2 se recogen otras *funciones de disuasión según impedancia*. Además, en el Anexo C se encuentra la recopilación de diferentes *función de disuasión según impedancia* en trabajos de accesibilidad o movilidad realizada por Geurs y Van Wee (2001), Reggiani, Bucci y Russo (2011a), Shrewsbury (2012) y Taylor (1975).

Función	$f(c_{ij}, \theta)$	Comentarios
Empírica – triporcional o por bloques	$\begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq c_{ij} \leq \theta_1^{sup} \\ b_\eta \in (0, 1) : b_{\eta-1} > b_\eta > b_{\eta+1} & \text{si } \theta_\eta^{inf} < c_{ij} \leq \theta_\eta^{sup} \\ 0 & \text{si } \theta_{\eta_{ult}}^{sup} < c_{ij} < \infty \end{cases}$	<p>En donde b_η el valor entre 0 y 1 que corresponde al η-ésimo bloque entre dos límites de impedancias y η_{ult} es el último bloque con valor $b_\eta \in (0, 1)$</p> <p>Se puede considerar como un híbrido entre la <i>función de disuasión según impedancia</i> y la función que se usa en las medidas de contorno.</p>
Exponencial normal	$e^{\theta \cdot c_{ij}^2}$	También se le ha llamado gaussiana modificada si se multiplica toda la función por una constante, por ejemplo 100.
(Log)logística modificada	$\frac{1}{1 + e^{\theta_1 + \theta_2 \cdot \ln(c_{ij})}} = \frac{1}{1 + e^{\theta_1} \cdot c_{ij}^{\theta_2}}$	<p>La definición teórica de esta función fue dada por Thorsen, Ubøe, y Nævdal (1999), según el cual las distancias provocan movimientos aleatorios mientras que las largas se rigen por el principio de menor distancia.</p> <p>Las dos formas son iguales, siendo la de la izquierda la observada en trabajos previos. Sin embargo, la forma de la derecha omite una componente logarítmica que puede llevar a confusión en caso de $c_{ij} = 0$.</p>
Tanner (1961)	$c_{ij}^{\theta_1} \cdot e^{\theta_2 c_{ij}}$	Combina el comportamiento de las funciones exponenciales negativas y de las potenciales negativas. También es llamada general, puesto a que si uno de los parámetros es 0, se obtiene la función exponencial negativa o la potencial negativa.

Tabla 1.2. Otras *funciones de disuasión según impedancia* (véase también Anexo C).

La utilidad de la elección de una y no otras funciones también depende de los valores que

adopten sus parámetros, es por ello que su correcta formulación es fundamental para entender cómo se perciben las oportunidades según la impedancia y cuál es la probabilidad de interactuar con ellas. Estudios como los de Condeço-Melhorado, Gutiérrez, y García-Palomares (2013), Kwan (1998), Stępnia y Rosik (2017), y Thill, y Kim (2005) entre otros, muestran la sensibilidad de los resultados a la definición de diferentes parámetros para un mismo escenario, así como consecuencias en el momento de la interpretación y extracción de conclusiones de sus resultados.

Trabajos anteriores han propuestos diferentes métodos de calibración, según el tipo de función. En cualquier caso, este proceso se suele basar en los datos de movilidad, ya que estos son los que permiten saber que predisposición de interacción tienen los individuos del área de estudio, pudiendo suponer que también estarían predispuestos a realizar la actividad si esta se encontrase más cerca³². Algunos de los métodos de calibración propuestos en trabajos anteriores se basan en:

- la estimación mediante la percepción de atributos cualitativos de cercanía o lejanía para las actividades (L. Miguel Martínez & Viegas, 2013),
- la estimación directa mediante la forma de la curva de supervivencia obtenida de las encuestas de viajes (Skov-Petersen, 2001),
- la calibración mediante el uso de regresiones lineales de la Ecuación 1.16 sin restricciones³³ (Iacono et al., 2008),
- la calibración durante el proceso de obtención de los parámetros de balanceo de la Ecuación 1.17 de la sección anterior por el método de Hyman, sólo para la *función de disuasión según impedancia* del tipo exponencial (Luis & Berodia, 2006; Ortúzar & Willumsen, 2011); este procedimiento calibra el parámetro de la función por un proceso iterativo en el que la impedancia media de la distribución de viajes obtenidas por calibración debe ser técnicamente igual al valor que se haya obtenido de la matriz observada,
- la calibración mediante funciones empíricas-triproporcionales (Luis & Berodia, 2006), tal y como muestra la Ecuación 1.19 de la sección anterior, y la posible conversión a una función de otro tipo.

³² Esta apreciación entra en contradicción con estudios que indican la necesidad de un tiempo mínimo para separar actividades, por ejemplo, de trabajo a casa (Salomon & Mokhtarian, 1998)

³³ Es decir, que no cumplan las condiciones expresadas en Ecuación 1.15

1.3.2. La componente del transporte en carreteras: el tráfico y la congestión

La componente del transporte de la accesibilidad, definida por las diferentes opciones de uso de redes y servicios de transportes disponibles, es la que permite conectar con un cierto coste y fiabilidad aquellos lugares que están geográficamente separados. Este poder de conexión ha convertido a esta componente en una de las más estudiadas y en la que ha recibido una mayor atención por parte de los diferentes agentes socioeconómicos.

La red de transportes y sus servicios suelen presentar una doble limitación que afecta a su rendimiento, a las interacciones entre la oferta de sus elementos y a la demanda de uso, y a su capacidad para afrontar incidentes y perturbaciones.

Por un lado, está la limitación física propia referida como la cantidad máxima de usuarios pueden usar cada arco de la red en una unidad de tiempo y/o espacial conocida que el conjunto de la red puede ofertar. Por el otro, está el hecho de que los elementos de la red de transportes crean una oferta efímera, es decir, o se usa en el momento en que se crea la oportunidad de uso o ésta se pierde, puesto a que no puede ser almacenada y liberada cuando la demanda así lo requiera. Además, al igual que ocurre en otros sistemas, cada elemento de la red se puede ver influenciado y limitado por el rendimiento de los otros elementos de la red debido al llamado efecto red.

Algunas de estas afecciones son los efectos *spillback*, en los que la longitud de una cola puede llegar a bloquear los flujos de intersecciones de aguas arribas incluyendo los que no deberían entrar en esa cola, y los efectos *spillover*, en los que flujos que no deben circular por vías congestionadas directamente, ven afectada sus prestaciones por deber compartir infraestructura con flujos que si se ven afectados y que transmiten, en cierta medida, los efectos de la congestión al resto de la red (Daganzo, 1999).

En el caso del tráfico y las carreteras, la relación entre la oferta y la demanda ha sido objeto de estudio desde principios del siglo XX, cuando la popularización e incremento del uso del coche empezó a generar incidentes y situaciones de saturación que afectaba a la capacidad de conexión de las infraestructuras del transporte, requiriendo disponer de modelos teórico-prácticos para la estimación y gestión de la congestión. Por otro lado, también hay que tener en cuenta el cómo poder modelizar el cómo los usuarios eligen sus rutas y, por lo tanto, se

convierten en demandantes de parte de los elementos de la red.

1.3.2.1. Modelos de tráfico

Los modelos que estudian el tráfico y como se forma la congestión en un arco de la red de carreteras se basan principalmente en los resultados producidos por las relaciones que hay entre el espacio entre vehículos y la velocidad a la que circulan que les permita adaptarse a las condiciones del tráfico con seguridad y sin colisionar con otros vehículos. La distancia mínima a mantener entre dos vehículos, bajo la suposición de aplicación inmediata del freno a su máximo rendimiento, se puede obtener de la resolución del sistema de ecuaciones definido por las ecuaciones teóricas (Ec. 1.20) del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA).

$$x' = x'' \cdot t + x'_0$$

Ec. 1.20

$$x = \frac{1}{2} x'' \cdot t^2 + x'_0 \cdot t + x_0$$

En donde, t es el tiempo entre la situación inicial y la calculada, x es la posición del móvil transcurrido t , x_0 es la posición inicial del móvil, x' es la velocidad del móvil transcurrido t , x'_0 es la velocidad inicial del móvil, x'' es la aceleración del móvil.

Los resultados obtenidos para diferentes casos de desaceleraciones, según valores típicos (TRB, 2000, pp. 8–1), y diferentes diferencias de velocidad se pueden observar en la Figura 1.8. Pese a que, la distancia real será mayor a estos valores puesto a la existencia de un tiempo de reacción y al rendimiento y evolución del proceso de frenado, los valores previos sirven para ilustrar la relación entre velocidad y distancia de seguridad, siendo mayor la distancia a medida que mayor es la velocidad.

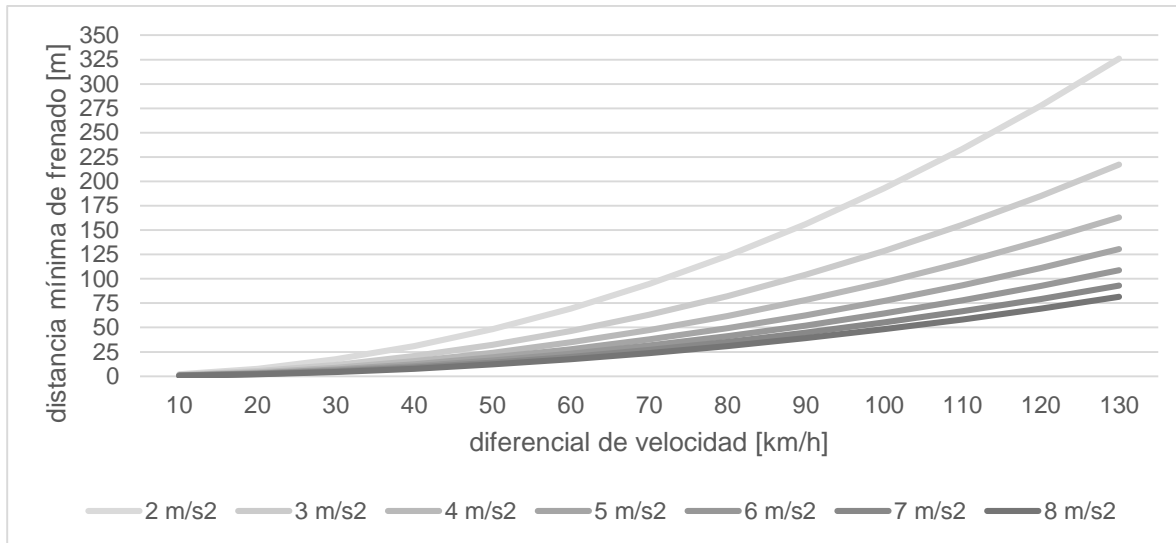


Figura 1.8. Distancia mínima para poder desacelerar según diferencial de velocidades entre la velocidad inicial y la final y el parámetro de desaceleración.

Observado en la realidad como el espaciado entre vehículos y la velocidad se relacionaba, Greenshields (1935) formuló la relación o ecuación fundamental del tráfico (Ec. 1.21), que ha servido para el desarrollo de las diferentes perspectivas de modelización del tráfico: modelos desde una perspectiva continua o *macro*, asociando el tráfico a modelos continuos para fluidos, o bien desde una perspectiva discreta o *micro*, mediante el estudio de la experiencia de cada vehículo; también existe una visión intermedia conocida como modelización *meso* del tráfico; ver la evolución de cada familia de modelos del tráfico en van Wageningen-Kessels, van Lint, Vuik, & Hoogendoorn (2015). La definición de la ecuación fundamental de la tesis se realiza en los términos de agregación de valores empleados en los modelos continuos.

$$q = k \cdot v_s = k \cdot v(k) \quad \text{Ec. 1.21}$$

En donde, q es el flujo, cuya unidad es número de vehículos que han pasado por un punto de la carretera en una determinada unidad de tiempo, por ejemplo, en [veh/h]. k es la densidad, cuya unidad es el número de vehículos que están presentes para un instante en un arco de la red de carreteras de longitud determinada, por ejemplo, en [veh/km]. v_s es la velocidad espacial media, es decir la velocidad media de los vehículos presentes en un arco de la red de carreteras de longitud determinada, por ejemplo, en [km/h].

Tal y como se puede ver en la Figura 1.9, la inversa del flujo es el valor medio del intervalo de

paso entre vehículos (Ec. 1.22), y la inversa de la densidad es el valor medio de la distancia entre vehículos, incluyendo la longitud del vehículo (de morro a morro, por ejemplo) (Ec. 1.23). Respecto a la velocidad, es la media armónica de las velocidades de los vehículos en un punto de la carretera³⁴.

$$q = \frac{|veh|}{tiempo} = \frac{1}{\frac{1}{|veh|} \cdot \sum_{n \in veh} intervalo_n} \quad \text{Ec. 1.22}$$

En donde, $|veh|$ es el número total de vehículos, $tiempo$ es el tiempo total de observación, $intervalo_n$ es el tiempo que ha tardado en pasar el vehículo n -ésimo con respecto al vehículo que precede por un punto determinado de la carretera en estudio.

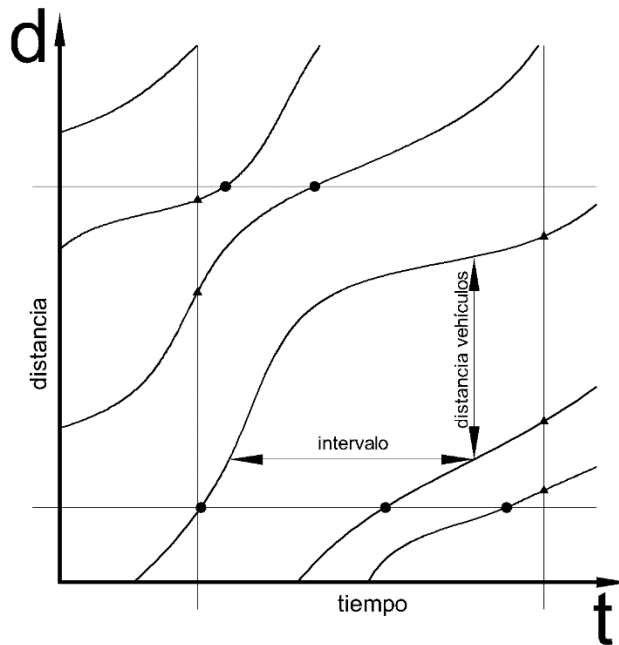


Figura 1.9: Diagrama de trayectorias para un tramo de carretera concreto.

$$k = \frac{|veh|}{longArco} = \frac{\sum_{n \in veh} tiempReco_r_n}{tiempo \cdot longArco} = \frac{1}{\frac{1}{|veh|} \cdot \sum_{n \in veh} distancia vehiculos_n} \quad \text{Ec. 1.23}$$

En donde $tiempReco_r_n$ es el tiempo que ha tardado el vehículo n -ésimo en recorrer la longitud arco de la red en estudio ($longArco$).

³⁴ Véase Ecuación 1.24.

$$\begin{aligned}
 v_s = \frac{q}{k} &= \frac{\frac{|veh|}{tiempo}}{\frac{\sum_{n \in veh} tiempoRecor_n}{tiempo \cdot longArco}} = \frac{|veh| \cdot longArco}{\frac{1}{|veh|} \cdot \sum_{n \in veh} tiempoRecor_n} = \\
 &= \frac{|veh|}{\sum_{n \in veh} \frac{tiempoRecor_n}{longArco}} = \frac{|veh|}{\sum_{n \in veh} \frac{1}{v_n}}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 1.24}$$

En donde, v_n es la velocidad del vehículo n -ésimo.

También se puede obtener el valor de la velocidad temporal media, es decir, la obtenida de la media de las velocidades de los vehículos (Ec. 1.25). Sin embargo, la velocidad temporal media es siempre mayor o igual a la velocidad espacial media, ya que la velocidad temporal media no pondera el hecho de que los vehículos más rápidos pasarán más veces por delante del punto de observación³⁵. La relación entre ambas velocidades se puede definir por la Ecuación 1.26 (Wardrop, 1952).

$$v_t = \frac{1}{|veh|} \sum_{n \in |veh|} v_n \tag{Ec. 1.25}$$

En donde, v_t es la velocidad temporal media.

$$v_t = v_s + \frac{\sigma_s^2}{v_s}$$

$$\text{s.t.:} \tag{Ec. 1.26}$$

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{|veh|} \cdot \sum_{n \in |veh|} (v_n - v_s)^2$$

En donde, σ_s^2 es la varianza de las velocidades con respecto a la velocidad espacial media.

La ecuación fundamental se define por tres variables, pero, tal y como se ha visto anteriormente, se puede considerar que la variable velocidad depende de la distancia entre vehículos y, por extensión, de la densidad del tráfico, o viceversa. En estudios anteriores, y

³⁵ Imagínese una carretera circular de 30km de perímetro. En ella, se identifica un punto como kilómetro 0 y se ubican 3 vehículos que circulan a 30km/h, a 60km/h y 90km/h respectivamente. En una hora, se observará en el punto kilométrico 0 que el vehículo que circula a 30km/h sólo pasa una vez, el vehículo que circula a 60km/h lo hará 2 veces y el vehículo que circula a 90km/h lo hará 3 veces. Para un observador en el punto kilométrico 0 y que desconoce que solo hay 3 vehículos, contabilizará que han pasado 6 vehículos, cuya velocidad media es de 70km/h. Sin embargo, para un observador que puede ver toda la carretera, sólo verá 3 vehículos que circulan a una velocidad media de 60km/h. La primera velocidad es la velocidad temporal media y la segunda es la velocidad espacial media.

por convención, se ha decidido definir la velocidad en función de la densidad, siendo algunas de las más recurrentes las mostradas en la Tabla 1.3. y en las que se observa su relación inversamente proporcional. Las funciones velocidad-densidad presentadas a continuación han sido obtenidas de diferentes observaciones realizadas en diferentes tipos de carreteras y en años diferentes.

Función	$v(k)$
Greenberg (1959)	$v_f \cdot \ln\left(\frac{k_{jam}}{k}\right)$
Greenshields (1935)	$v_f \cdot \left(1 - \frac{k}{k_{jam}}\right)$
Underwood (1969)	$v_f \cdot e^{\frac{-k}{k_{jam}}}$

Tabla 1.3. Algunas de las funciones velocidad-densidad definidas para el estudio del tráfico.

En donde v_f es la velocidad media en flujo libre y k_{jam} es la densidad máxima del tráfico.

Conociendo los valores de dos de las tres variables del tráfico, se puede cualquier posible estado del tráfico y, en consecuencia, obtener el tercer valor. Estos pares de variables se pueden dibujar en los llamados diagramas fundamentales del tráfico, permitiendo observar gráficamente la relación de ambas variables.

En el diagrama flujo – densidad de la función de Greenshields, como el que se representa en la Figura 1.10 - eje de la izquierda, se puede observar claramente dos secciones diferenciadas. En la primera, tanto el flujo como la densidad aumentan sus valores hasta alcanzar un valor máximo de flujo, que representa la capacidad máxima de la vía. Ésta es la sección de estados no congestionados. En la segunda sección, el flujo disminuye pese a que la densidad aumenta, esto se debe a la reducción de velocidad que obliga a adoptar a los conductores por la disminución de la distancia entre vehículos consecuencia de una mayor densidad; los estados de esta sección están congestionados.

Nótese que el valor de mayor flujo, siendo la capacidad de la vía, corresponde para la mitad de la velocidad máxima, así como el valor de la pendiente de la recta que une cada estado con el origen (0,0) es la velocidad espacial media, la tercera componente de la ecuación fundamental del tráfico.

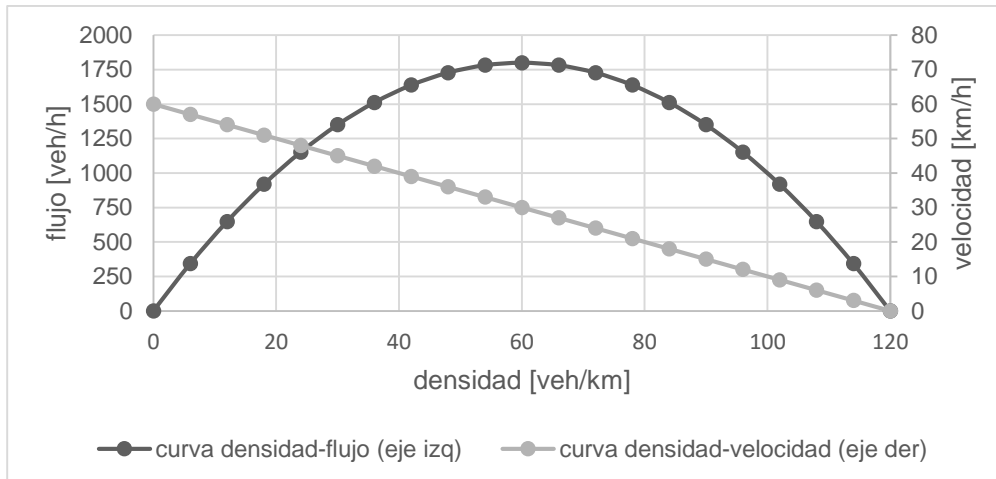


Figura 1.10³⁶. En el eje izquierdo, diagrama densidad – flujo. En el eje derecho, diagrama densidad – velocidad. Obsérvese como los puntos de la misma línea vertical muestran los 3 valores del tráfico.

Los modelos continuos del tráfico, o modelos LWR por las iniciales de los investigadores que definieron sus principios Lighthill y Whitham (1955), y Richards (1956) exploran las propiedades de la relación fundamental del tráfico mediante valores medios de las observaciones realizadas para periodos de tiempo largos que permitan eliminar valores atípicos y ruidos. Estos modelos están basados en entender el tráfico como modelos continuos de fluidos y los cambios de los estados del tráfico como ondas cinemáticas. Estos modelos permiten obtener una aproximación del comportamiento y la propagación de efectos en el tráfico, con mayor grado de precisión cuando puede existir una mayor interacción entre vehículos, es decir estados diferentes al de flujo libre.

La principal característica de los modelos continuos es la necesidad de garantizar correctamente la conservación del número de vehículos en el arco de la red estudiado. Es decir, que, si no hay posibilidad de entrar entrada o salida de vehículos, la diferencia de densidad en dos instantes diferentes debe ser igual a la diferencia de flujo de entra y salida del arco de la red para el periodo estudiado. Este principio se resume en la Ecuación 1.27

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad \text{Ec. 1.27}$$

³⁶ Los valores de la Figura 1.10 son teóricos, bajo la premisa de carretera de velocidad máxima 60km/h, densidad máxima de 120 veh/km y usando la fórmula de Greenshields.

La propagación de las características de estados del tráfico en los arcos se define como ondas cinemáticas, cuya velocidad de propagación es el valor de la derivada del flujo con respecto a la densidad para cualquier estado (Ec. 1.28). Mientras no se produzca un cambio de estado del tráfico, las ondas emitidas por ese estado no colisionan ya que son paralelas entre ellas. El valor de la velocidad de propagación de estas ondas es siempre inferior a la velocidad espacial media de los vehículos, de manera que sus efectos siempre se propagan hacia atrás en relación a los vehículos de la carretera (Lighthill & Whitham, 1955)³⁷.

$$\frac{\partial q}{\partial k} = v(k) + k \cdot \frac{\partial v(k)}{\partial k} \quad \text{Ec. 1.28}$$

Cuando se produce un cambio de estado, las ondas del nuevo estado pueden colisionar con las ondas del estado anterior, creando un frente de choque cuyo estudio permite estimar hasta donde puede afectar un cuello de botella o una incidencia en el tráfico (cierres de un carril, circulación lenta anómala...).

La velocidad de este frente de choque se define en la Ecuación 1.29, el cual también se puede obtener gráficamente en el diagrama fundamental de la Figura 1.10 como la pendiente de la recta que une los dos estados afectados. Los frentes de choque pueden, a su vez, colisionar y producir otros nuevos frentes de choques, ya que los estados a ambos lados del nuevo frente de choque son diferentes.

$$u = \frac{q_1 - q_0}{k_1 - k_0} \quad \text{Ec. 1.29}$$

En donde, u es la velocidad de la onda de choque producida por el cambio de estado en el tráfico.

Los modelos macro, como simplificaciones en relaciones continuas de un fenómeno discreto, no pueden resolver todas las cuestiones que se pueden plantear, debiendo usar en algunos casos los postulados de la teoría de colas, como, por ejemplo, para entender la afectación de los peajes en el tráfico, entre otros.

Por su parte, los modelos discretos o *micro* de estudio del tráfico, llamados también modelos de seguimiento de coches, o *Car Following Models* en inglés, se basan en realizar

³⁷ Este hecho se ve reflejado en que el término $\frac{\partial v(k)}{\partial k}$ de la Ecuación 1.28, que representa el coste marginal de la velocidad con respecto a la densidad, es menor o igual a 0 en el caso del tráfico.

microsimulaciones que permitan estudiar el comportamiento³⁸ de cada vehículo en la red, desde que sale de su origen hasta que llega a su destino, reportando valores y cambios de estado para cada intervalo del estudio, así como los resultados individualizados de tiempo y longitud de colas entre otros. Estos modelos, además, permiten recrear virtualmente los métodos de observación del tráfico que se realizan en la realidad. En la versión más sencilla, como la del trabajo de Pipes (1953), los modelos discretos simulan, en la medida de lo posible, la reacción de los vehículos según los cambios de velocidad del vehículo que preceden:

- La velocidad del vehículo en estudio es idéntica a la del vehículo al que precede y no se desea o no se puede modificarla. En este caso, se debe garantizar la existencia de una distancia de seguridad adecuada, o en caso contrario, tomar las medidas oportunas para conseguirla en un tiempo determinado. El usuario también puede optar por una reducción de velocidad, como por ejemplo para prepararse para salir de una vía e incorporarse en otra.
- La velocidad del vehículo en estudio es inferior a la del vehículo al que precede; en este caso el vehículo en estudio puede optar en acelerar para igualar la velocidad del otro vehículo en la medida que sus características lo permitan o decidir que aumente la distancia. Este caso también se da en incorporaciones a vías o aumentos de la velocidad máxima permitida.
- La velocidad del vehículo en estudio es superior a la del vehículo que precede, de manera que debe frenar para adaptarse a esta nueva a la vez que debe garantizar mantener una distancia de seguridad. Este caso también ocurre al salir de una vía para incorporarse a otra, delante de señales de ordenación de la preferencia del tráfico o elementos reductores de la velocidad.

Los diferentes modelos discretos basan sus tomas de decisiones en adaptaciones y simplificaciones de estas ecuaciones a los comportamientos observados en carretera. Los modelos discretos tienen un elevado coste computacional debido a la necesidad de conocer el estado de cada vehículo de la simulación para cada instante de la simulación.

En cualquier caso, cualquiera de los modelos de estudio del comportamiento y propagación de los efectos del tráfico, al igual que cualquier otro modelo, es una simplificación útil de la realidad. Esto significa que se han tenido que asumir unas hipótesis de cálculo que, pese a

³⁸ El comportamiento de un vehículo se puede definir por su velocidad, aceleración, decisión de cambio de carril o incorporación a una vía, entre otros aspectos.

ser irreales o poco probables, no afectaban al conjunto del resultado. Por ejemplo, los modelos más sencillos asumen que todos los vehículos son idénticos o su comportamiento es similar: un camión es de mayor longitud que un coche particular y, por lo tanto, ocupará más longitud del arco de la red de carreteras; además sus características técnicas no le permitirán aplicar los mismos parámetros de aceleración y desaceleración que otro tipo de vehículos. Incluso dentro del mismo tipo de vehículo, hay un amplio abanico de tipos de usuarios, desde aquellos que son noveles o que son la primera vez que conducen por ese arco de la red y, por lo tanto, suelen tomar modos de conducción más conservadores, hasta aquellos que tienen gran experiencia. Una técnica habitual para tener en cuenta esta heterogeneidad de tipos de vehículos y usuarios es transformarlos a valores tipo mediante el uso de factores ponderadores (TRB, 2000, pp. 2–3).

1.3.2.2. Modelos de asignación de flujos

El uso de cada arco de la red de carreteras está condicionado por la ruta que cada usuario elige para ir de un origen a un destino. En términos generales, para cada par origen-destino, existen varias rutas factibles³⁹ por lo que es necesario establecer algunos criterios para conocer no solo como cada usuario elige su ruta sino cual es el volumen de cada una de ellas y así poder estimar efectos en los arcos de la red, sabiendo que el flujo total para cada origen-destino es fijo y conocido (Ec. 1.30) y teniendo en cuenta la competencia que hay entre relaciones para que su flujo use una red con capacidad limitada.

$$T_{ij} = \sum_{r \in rutas_{ij}} T_{ij}^r \quad \text{Ec. 1.30}$$

En dónde, T_{ij}^r es el volumen de viajes entre la zona i -ésima y la zona j -ésima que usa la ruta r -ésima, y $rutas_{ij}$ es el conjunto de rutas que une la zona origen i -ésima con la zona destino j -ésima. Nótese como T_{ij}^r debe ser mayor o igual a 0, debido a su naturaleza.

Los modelos de elección de asignación de flujos son los usados en la 4ª etapa del modelo de 4 etapas y han sido usados para entender y/o predecir qué efectos puede tener una apertura o mejora en la red, como por ejemplo la eliminación de un cuello de botella, o también para conocer qué puede ocurrir si una incidencia o trabajos en la red se alarga en el tiempo

³⁹ Entiéndase como rutas factibles aquellas que tienen posibilidades de ser usadas, que usen el mismo algún arco de la carretera más de una vez...

(Safirova, Gillingham, & Houde, 2007), pudiendo hallar cuellos de botella secundarios.

Como se ha visto en la sección anterior, un mayor requerimiento de uso de cualquier arco de la red, ya sea por los flujos de una ruta o de varias rutas, provoca una disminución de la velocidad a la que los vehículos pueden circular y, en consecuencia, aumenta el tiempo de viaje que experimentarán los usuarios. Generalmente en estos modelos se aplican funciones llamadas de *volumen-retraso* o *Volume-Delay Function* (VDF) en inglés, en la que se relaciona tiempo para recorrer un arco en función de la capacidad, como, por ejemplo, la mostrada en la Ec. 1.31.

$$tiempRecor_{arc}(q) = tiempRecor_{arc}(0) \cdot l\left(\frac{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r \in rutas_{ij}} \varphi_{ijr} \cdot T_{ij}^r}{q_{\max}}, \kappa\right) \quad \text{Ec. 1.31}$$

En dónde, $tiempRecor_{arc}(q)$ es el tiempo necesario para recorrer el arco arc -ésimo según el flujo que solicita usar el arco y $tiempRecor_{arc}(0)$ es el tiempo necesario para recorrer el arco arc -ésimo a velocidad de flujo libre, o equivalente a sin tráfico, $l(\dots)$ es la función que relaciona el incremento del tiempo de recorrer el arco de la red según su capacidad⁴⁰ y el tráfico previsto, $\varphi_{ijr}(arc)$ es una variable binaria que indica si el arco arc -ésimo es usado por la ruta r -ésima de la relación entre la zona origen i -ésima y la zona destino j -ésima, κ es el conjunto de parámetros de la función VDF.

Estas funciones también explican cómo llegado a un punto en el que la velocidad empieza a disminuir al añadir un nuevo vehículo, el coste marginal de introducir un vehículo más en el arco de la red de carretera en estudio es superior al incremento del coste medio que supone esta acción. Es por ello que los conductores no perciben el efecto total que tiene su acción sobre la red, ya que sólo experimentan la velocidad media (Bull, 2003).

La variación de los tiempos de viaje según los flujos puede provocar que la ruta que inicialmente, sin congestión en ningún arco, fuese la de menor coste, se convierta al congestionarse en una ruta con costes más elevados que otras y, en consecuencia, incitar a parte del flujo a emplear estas rutas alternativas en la medida que la competencia con los flujos de otras relaciones lo permita. Wardrop (1952) propuso dos criterios alternativos para modelizar la elección de la ruta y como considerar los cambios de ruta que deben realizar

⁴⁰ La capacidad del arco debe estar conforme al periodo temporal del estudio.

parte del flujo:

1. Primer principio de Wardrop o equilibrio de usuario⁴¹: *“Los tiempos de viaje en todas las rutas es igual, y menor al tiempo que experimentaría cualquier vehículo que decidiera cambiar a otra ruta”*. Los modelos que siguen este principio se centran en el intento que tienen todos los usuarios de minimizar su tiempo de desplazamientos, siendo usadas solamente las rutas que son de coste mínimo, las cuales pueden ser una o varias.
2. Segundo principio de Wardrop o equilibrio de sistema⁴²: *“el tiempo promedio de viaje de todos los vehículos es mínimo”*. Los modelos que siguen este principio intentan ordenar asignar a cada ruta el flujo que garantice que la suma de coste total de los vehículos es la mínima. Bajo este principio, algunos vehículos de algunas rutas deben usar rutas de costes superiores que los que emplean otras rutas.

Como generalización, el problema de la elección de rutas tiene solución única a nivel de arcos (Sheffi, 1985, p. 66), es decir, de flujo que debe pasar por cada arco para alcanzar alguno de los equilibrios de Wardrop es único en cada caso de estudio, pero no así a nivel de caminos, puesto a que existen diferentes combinaciones de caminos que pueden obtener. Por otro lado, la solución para el primer principio de Wardrop y para el segundo sólo pueden la misma en el caso de que la red no esté congestionada (Sheffi, 1985, p. 72). Es decir, el añadir un vehículo más a la cualquier par origen-destino no afecte ni a la distribución de flujos en la red ni al rendimiento de los diferentes arcos que la conforman. Finalmente, del estudio y comparación de ambos principios, se ha podido reportar la paradoja de Braess (Braess, 1968; Braess, Nagurney, & Wakolbinger, 2005), según la cual, la apertura de un nuevo vial puede hacer incrementar el coste medio del uso de la red, con la misma demanda de viajes para cada relación, debido a la reordenación de los flujos según el primer principio de Wardrop.

Los modelos derivados de los principios de Wardrop también pueden incorporar las diferencias de percepción del coste que tiene cada usuario con respecto a los costes esperados en cada una de las rutas a elegir, obteniendo los modelos estocásticos, o la incorporación de variaciones de los rendimientos de la red a lo largo del viaje en el modelaje de la elección de las rutas, siendo modelos de asignación de tráfico dinámicos.

⁴¹ Cita original: “The journey times on all the routes actually used are equal, and less than those which would be experienced by a single vehicle on any unused route”.

⁴² Cita original: “The average journey time is a minimum.”

1.3.3. El reto del estudio de la accesibilidad en entornos dinámicos.

Los estudios tradicionales de accesibilidad han considerado que los valores de rendimiento de la red, principalmente determinados por la categoría funcional de cada arco (D. Levinson et al., 2017), y los valores de la distribución espacial de oportunidades u otros parámetros son constantes para el escenario de cálculo. Este tipo de estudios se llaman estáticos o convencionales y suele ser usados para la toma de decisiones a nivel estratégico.

Sin embargo, la premisa de valores constantes no es adecuada en aquellos estudios en los que las condiciones varían a lo largo del mismo escenario, haciendo que los resultados sean también dependientes del momento del día de inicio o llegada de cada relación o el método de cálculo de la ruta que une cada relación, entre otros. Puesto que los fenómenos dinámicos sólo pueden ser estudiados correctamente con metodologías dinámicas (Ben-Akiva, 1985), el incluir adecuadamente la componente temporal, es decir el comportamiento dinámico, en las componentes que constituyen la accesibilidad, mediante la modificación de las técnicas clásicas (sección 1.3.1.2) o la creación de nuevas, da lugar a una nueva visión necesario de la accesibilidad: la accesibilidad dinámica.

Este cambio de paradigma conlleva una serie cambios y de nuevos parámetros de cálculo que no estaban presentes explícitamente en los estudios de accesibilidad estática. La elección de unos parámetros y no otros definirán el resultado de los valores obtenidos de una manera similar a la misma elección del indicador, y por ello es conveniente conocer el sentido de cada una de las posibles elecciones.

En el ámbito de la componente *transporte*, el rendimiento de los elementos que la componen pueden variar a lo largo del día. Cada relación necesaria para estimar la accesibilidad se encontrará con una impedancia para recorrer cada arco de su ruta que puede depender del momento en que necesite usarlo, y de la relación demanda-capacidad y efectos de red, tal y como se ha explicado en secciones anteriores. Esto hecho produce que dos relaciones cuyo viaje empieza a la misma hora y que deban usar un mismo arco en momentos distintos puedan experimentar impedancias durante el uso de ese mismo arco. Del mismo modo, la estimación de los tiempos de viaje para una misma relación en momentos de salida consecutivos puede proporcionar tiempos y rutas diferentes. Convencionalmente, se estiman las diferentes impedancias según la ruta que minimiza este valor.

Una de las primeras consideraciones a tener en cuenta es el tratamiento de la evolución de la red a lo largo del día para el cálculo de las impedancias. En materia de transporte privado se puede hablar de dos principales modelos, los cuales son usados en programas de simulación de asignación dinámica del tráfico (Boyce, Lee, Janson, & Berka, 1997; Chiu et al., 2011; Ran, Boyce, & Leblanc, 1993). Véase la Figura 1.11.

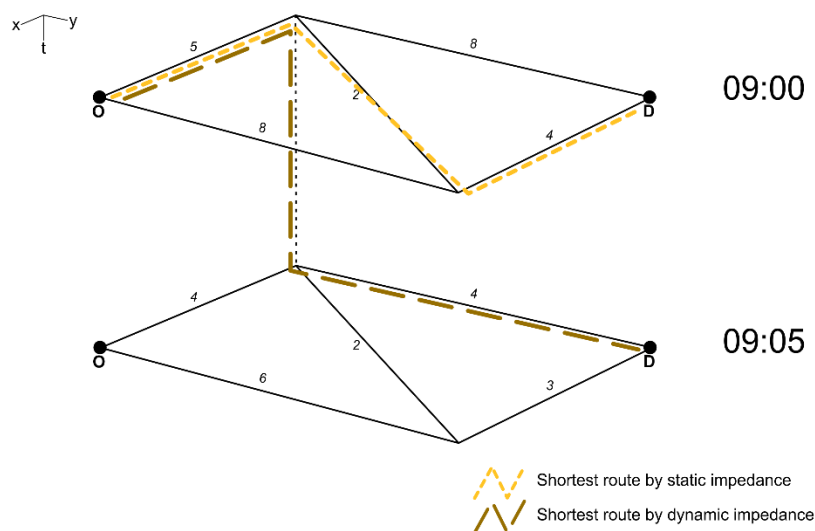


Figura 1.11: Rutas según el modelo de valoración de las redes. Fuente: Moya-Gómez, B. y García-Palomares, J.C. (2015)

El modelo más sencillo se denomina tiempo de viaje instantáneo o *instantaneous travel time* en inglés (Ecuación 1.32). Este modelo se basa en el principio de que los rendimientos de la red sólo cambian al iniciar o finalizar cada cambio de escenario, pero no durante el tiempo que se necesita para completar cada una de las relaciones necesarias para medir de la accesibilidad. En este caso, el valor de la impedancia de cada arco es constante, pudiéndose usar algoritmos de búsqueda de caminos mínimos estáticos como el de Dijkstra (1959) tradicional.

$$c_{ij}^{stvat} = \sum_{arc \in F} \varphi_{ij(arc)}^{stvat} \cdot c_{arc}^{stvat} \quad \text{Ec. 1.32}$$

En el que, c_{ij}^{stvat} es el valor de la impedancia entre la zona i -ésima y la zona j -ésima habiendo salido de la zona i -ésima a una determinada hora (dt) o habiendo llegado a la zona j -ésima a una determinada hora (at), c_e^{stvat} es el valor de la impedancia del arco arc -ésimo valorado en el momento de iniciar el viaje en la zona i -ésima (dt) o de finalizarlo en la zona j -ésima (at),

$\varphi_{ij(arc)}^{stvat}$ es una variable binaria que expresa si la ruta entre la zona i -ésima y la zona j -ésima y valorada según su hora de salida (dt) u hora de llegada (at) utiliza el arco arc -ésimo, y F es el conjunto de arcos de la red.

Nótese de que este modelo siempre hará referencias a rendimientos actuales o pasados de los arcos a los que se encontraría cada relación y que puede tener en consideración escenarios poco probables, es decir, el que un viaje deba circular por todos los arcos en situación de congestión elevada que difícilmente podrá ser experimentada por un individuo; como resultado, la accesibilidad estimada será menor que la realmente a la que se debería obtener.

Este tipo de modelo se puede considerar que ha sido usado en Li, Zhang, Wang y Zeng (2011), en Vandenbulcke, Steenberghen y Thomas (2009), y, aparentemente, en Sweet, Harrison y Kanaroglou (2015). También se ha usado la variante de evaluar la red en la hora que cae en medio del intervalo formado las horas de salida y llegada a dos actividades prefijadas en Weber y Kwan (2002).

Por el otro lado, el modelo que estima la experiencia real que los usuarios pueden experimentar en la realidad se denomina tiempo de viaje experimentado o *experienced travel time* en inglés. Este modelo incorpora el rendimiento de cada arco según el momento en que se quiere hacer uso del mismo, no de situaciones pasadas como el modelo anterior (Ecuación 1.33). Este tipo de modelo ha sido usado en Wu y Miller (2002) para el estudio de los efectos de la congestión en Salt Lake City (Estados Unidos de América) con datos de tráfico obtenidos mediante una aproximación dinámica de la congestión mediante simulaciones.

$$c_{ij}^{stvat} = \sum_{m \in M} \sum_{arc \in F} \varphi_{ij(arc)}^{(stvat)m} \cdot c_{arc}^m \quad \text{Ec. 1.33}$$

En donde, $\varphi_{ij(arc)}^{(stvat)m}$ es una variable binaria que expresa si la ruta entre la zona i -ésima y la zona j -ésima según su hora de salida (dt) u hora de llegada (at) utiliza el arco arc -ésimo en el momento m -ésimo, c_{arc}^m es el valor de la impedancia del arco arc -ésimo valorado en el momento m -ésimo, y M es el conjunto de posibles tiempos de uso de cualquier arco de la red.

Para este modelo, el tipo de impedancia puede afectar al comportamiento de la ruta. Existe la posibilidad de que, si se usan costes monetarios como impedancias y no se imponen otras condiciones de comportamiento, la ruta que minimice la impedancia realice alguna espera a

lo largo del camino. En el caso extremo de que sólo realice esperas en origen, el coste total de la impedancia de la relación sería mayor o igual al que se considera en la salida justo en el momento en que puede empezar a hacerlo con la menor impedancia en movimiento, es decir, con las condiciones de tráfico más favorables, debido a los costes derivados de las esperas.

Un caso especial, que facilita el uso de estos modelos, por poder encontrar la solución de caminos mínimos mediante la modificación de los algoritmos estáticos sin que esto suponga un incremento de la complejidad computacional es imponer que el orden de llegadas a destino también dependerá del orden de salida en cada origen, es decir, que quien sale antes deberá llegar antes: son los modelos de caminos mínimos dinámicos *First In First Out* (FIFO) (Chabini, 1998; Dean, 2004).

Desde el punto de vista del transporte público, la variación temporal de la oferta de sus servicios puede ser fácilmente recogida con la incorporación en los estudios de los horarios de servicios o tablas de intervalos de paso aproximado, según corresponda. La aparición del formato *General Transit Feed Specification* (GTFS) (Google, 2016), formato que usa la herramienta Google Maps para calcular rutas en transporte público en varias ciudades y regiones del mundo con información procedente de las respectivas agencias de transporte público y operadores y que, además, suelen disponer en sus respectivos portales de datos abiertos, ha convertido a este formato en el formato estándar de facto y sobre el cual se han desarrollado varias herramientas para su tratamiento.

Esta disponibilidad de datos bajo un mismo formato y de herramientas con el que poder trabajar con ellos ha supuesto un incremento del número de trabajos relacionados con movilidad y transporte público, véase por ejemplo Boisjoly & El-Geneidy (2016), Fransen et al. (2015) y van Eggermond & Erath (2015).

En el ámbito de la componente *usos del suelo*, la distribución espacial y cantidad de las oportunidades cambian a lo largo del día según los horarios de apertura y cierre de las actividades (Y. Chen et al., 2011; Islam et al., 2008; Neutens, Delafontaine, Schwanen, & van de Weghe, 2012), y de su organización de recursos para poder satisfacer adecuadamente al mercado u obligaciones. La hora de llegada a un destino se vuelve determinante para determinar el número de oportunidades con el que se puede interactuar y, en consecuencia, a tener en consideración en la medida de accesibilidad.

Por ejemplo, en la estimación de la accesibilidad a centros comerciales, es evidente que, si una relación llega en un momento en el que no se encuentra abierto, el valor de las oportunidades en destino para ese caso es nulo. Como resultado, relaciones que pueden iniciar el viaje a la misma hora, consideran de manera diferente el peso de las oportunidades en destino puesto a que sus horas de llegadas son diferentes. La llegada a destino cuando las oportunidades no están disponibles no significa que se deba considerar siempre como valor nulo, se puede establecer alguna penalización por espera, previa definición de espera máxima. De la misma manera, se pueden “adelantar” los tiempos de cierre para indicar que, pese a que se ha llegado a una hora en que las oportunidades del destino están aún abiertas, se considere que no se dispondrá del tiempo mínimo para realizar la actividad relacionada.

Por parte de la componente *individual*, su dinamismo puede incorporarse mediante la determinación de las agendas de cada individuo, propio de las medidas de accesibilidad personal, o mediante la definición de disponibilidad o autorización de uso de los vehículos necesarios para realizar el desplazamiento, como por ejemplo los dependientes a horarios de servicios de transporte, de servicios de compartir vehículo, entre otros.

Otro aspecto que puede ser incorporado bajo la componente *individual* es la variación de la percepción del viaje, es decir la variación de la *función de disuasión según impedancia* para tiempos de viajes. Intuitivamente se puede deducir que en horas puntas, cuando mayor tiempo conllevan los viajes, la cola de esta función se estira, aumentando la probabilidad de interacción para tiempos de desplazamiento mayores. Esto es debido a la necesidad obligatoria de cumplir con la actividad de destino, por ejemplo, trabajo o estudios, independiente al tiempo de viaje de ese momento. Casas (2003) valoró indirectamente los posibles cambios en esta percepción a partir de diferentes escenarios de congestión y de alternativas preestablecidas.

Esta variación también puede darse en los distintos modos de transportes e incluso con impedancias en modo de distancia. Por ejemplo, puede darse el caso que en horario nocturno se reduzca la probabilidad de interacción con actividades lejanas si se debe acceder a pie o en bicicleta pese a que son realizadas con normalidad en horas diurnas.

Como resultado de la incorporación del dinamismo en las medidas de accesibilidad, ya no sólo se puede hablar de accesibilidad activa o pasiva, sino que también se debe hacer denotar en qué lugar se focaliza la importancia de establecer la hora del estudio. Estas observaciones son válidas tanto para la accesibilidad activa, como para la pasiva.

En aquellos estudios en los que el interés está puesto en la estimación de la accesibilidad de cada origen según sus horas de salida y en estimar las correspondientes llegadas a todos los destinos según las condiciones de la red de transporte pueden llamarse estudios de accesibilidad activa según hora de salida. En estos estudios, los efectos de la congestión se hacen atrás en el tiempo: los viajes que se inicien en una zona alejada de un arco que se congestionará en un momento determinado, experimentarán esta congestión para la hora de salida que requiera usar ese arco en ese momento de congestión. Este desfase temporal puede ser de varios minutos, e incluso horas.

Los estudios según horas de salida pueden hacer ser útiles para la planificación de servicios que pueden activarse en cualquier momento del día como son los servicios de emergencias o servicios de reparto de mercancías urbanas basadas en esquemas *Just-In-Time*, como el reparto de pizzas.

De manera similar, cuando el foco del estudio se centra en el valor de accesibilidad correspondiente en cada origen habiendo llegado a todos los destinos a una hora concreta, o con una ventana temporal predeterminada, y empezando el viaje en el momento necesario para cumplir con la premisa de llegada, como pueden ser los estudios sobre la llegada a puestos de trabajo o estudio. En este caso, se estaría hablando de estudios de accesibilidad activa según hora llegada. En estos estudios, los efectos de la congestión se propagan hacia delante en el tiempo, puesto a que, para llegar a cada destino en una hora en concreto, se puede haber requerido iniciar el viaje en momentos que puede ser afectado por la congestión.

Nótese que independientemente del tipo de estudio, las oportunidades deberán tomar el valor correspondiente en destino a las respectivas horas de llegadas para los estudios de accesibilidad activa o en origen en sus respectivas horas de salidas para los estudios de accesibilidad pasiva.

Las medidas de accesibilidad tradicionales pueden ser adaptadas para incluir los fenómenos dinámicos mediante la generalización para los indicadores de accesibilidad activa de localización de actividades zonal. Esta generalización se puede expresar tal y como se muestra en la Ecuación 1.34, para los indicadores *zonales basados en la localización de actividades*.

$$a_i^{dtvat} = \sum_{j \in N} d_j^{atr} \cdot f^{dtvat}(c_{ij}^{dtvat}, \theta^{dtvat}) \quad \text{Ec. 1.34}$$

En el que a_i^{dtvat} es el valor de la accesibilidad para la zona i -ésima saliendo de origen a una determinada hora (dt) o llegando a zona j -ésima a una determinada hora (at), d_j^{atr} es el valor de las oportunidades en la zona j -ésima a una determinada hora y se asocia a la hora de llegadas de cada una de las rutas (atr), $f^{dtvat}(c_{ij}^{dtvat}, \theta^{dtvat})$ es componente que corresponde a la función que pondera la posibilidad de interacción o conteo de oportunidades según la impedancia para ir de la zona i -ésima a la zona j -ésima, según si está se considera a partir de la hora de salida de la zona i -ésima (dt) o si se considera a partir de la hora de llegada a la zona j -ésima (at), θ^{dtvat} es el conjunto de parámetros que definen la función que pondera la posibilidad de interacción o conteo de oportunidades que puede variar según si se establece según hora de salida (dt) u hora de llegada (at).

Nótese como el valor de las oportunidades depende de cuando lleguen las rutas a ese destino. Mientras que, para los estudios basados en horas de llegada, el valor será único en cada etapa de cálculo puesto a que todas las rutas llegarán al mismo tiempo, para los estudios sobre horas de salidas, se deberá estimar convenientemente el valor de las oportunidades según vayan llegando cada una de las rutas que han salido de sus orígenes al mismo tiempo. También que la componente c_{ij}^{dtvat} depende del criterio de cálculo, expresado en las Ecuaciones 1.32 ó 1.33.

En relación con el análisis de los resultados se deben considerar varios aspectos. Uno está relacionado la naturaleza de indicador de potencial de interacción de la accesibilidad y de cómo este indicador hace referencia a como se perciben las oportunidades espacialmente distribuidas. Es importante recordar que el indicador de accesibilidad no tiene, por definición, en cuenta cual es la elección de cada usuario en cuanto si usa alguna oportunidad y cuál de ellas usa; por lo tanto, no captura si un cambio de uso de oportunidades por parte de cada individuo modifica el rendimiento de cada tramo de la red con capacidad⁴³. Estos cambios se capturarían del correspondiente estudio recurrente de interacción accesibilidad-movilidad.

Sobre el formato de los resultados de la accesibilidad dinámica, entendida como una secuencia de valores obtenidos del cálculo de la accesibilidad con componentes dinámicas

⁴³ Véase sección 1.3.2.2.

ordenados cronológicamente, no sólo cambia la manera según se valora cada una de las componentes y cómo se relacionan entre ellas, sino que también supone un cambio en el tipo de resultado obtenido y en la forma de analizarlo.

Entre las diferencias más destacadas del cambio de paradigma está el tipo del propio resultado de la accesibilidad. Mientras que en la accesibilidad estática los resultados sólo representaban un valor o conjunto de valores discretos, en la accesibilidad dinámica el resultado es un dato funcional (Ramsay & Silverman, 2006), que se puede expresar como una función.

Este nuevo dato puede ser creado mediante la observación de un número finito de mediciones, a intervalos iguales o no, que, junto con asunción una serie de criterios de forma, continuidad y derivabilidad, dan lugar a la función que permite interpolar resultados y obtener los perfiles o las “curvas” que mejor representa el comportamiento de la accesibilidad. Obsérvese que el objetivo es reducir el resultado de un número infinito de posibles valores que se pueden obtener a un número finito de parámetros que definían la función de la serie longitudinal.

En algunos casos, además, se debe realizar una limpieza de los resultados en bruto, como puede ser la necesidad de suavizar las funciones obtenidas, por ejemplo, mediante el uso de medias móviles, eliminar valores outliers y ruidos en la medida que el estudio lo requiera. Este caso es muy habitual en trabajos en que la componente transporte depende de horarios, puesto a que la diferencia entre salir a una hora o un minuto más tarde puede ser determinante por el hecho de poder requerir hacer una espera en el segundo caso, véase los resultados de (Farber et al., 2014; Owen & Levinson, 2015).

El cambio de tipo de resultado también requiere un cambio de análisis, interpretación y visualización. En los estudios estáticos, el número limitado de conjuntos de valores, uno para cada escenario, permite la relación directa entre ellos, o con respecto a un escenario de referencia. Además, estos resultados comparativos, a su vez, permiten una sencilla visualización en series de mapas.

Una posible forma de tratar estos resultados dinámicos de manera sencilla, pero no por ello menos interesante, es convertir las funciones en valores que representen sus características principales, tanto para todo el periodo de estudio o para una parte de él: en valores medios, desviaciones estándares, coeficientes de variación, valores medianos o referentes a algunos

de los percentiles entre otros valores.

Además, también se pueden obtener otras relaciones de interés como por ejemplo el número de horas que se estima que su accesibilidad es inferior a la que pueden obtener según un valor de referencia (la accesibilidad obtenida en condiciones de flujo libre o de máximo servicio de transporte público). Estos valores se pueden estudiar mediante la estadística espacial y cartografiar con las técnicas usadas en estudios estáticos.

Nótese que el flujo de trabajo para analizar los resultados propuesto en esta sección requiere dividir la secuencia de análisis, ya sea primero analizando la componente temporal de los resultados para, a continuación, centrarse en la espacial, o viceversa. En la evolución de este proceso se debe asumir que se pueden perder parte de los resultados, especialmente aquellos que son productos de los efectos combinados y que son de alto interés.

Finalmente, en el ámbito de la representación de los resultados, el uso de mapas dinámicos, tanto en formato vídeos o en mapas interactivos es altamente aconsejable. Sin embargo, el uso de estas técnicas también requiere tener en consideración el hecho de que, a diferencia de las representaciones estáticas en las que el observador puede dedicar todo el tiempo que requiera para analizar los elementos del mapa, en una animación, ese tiempo es breve para cada fotograma. Esto hace que la información que puede ser redundante o de poco interés a la animación pueda dificultar la capacidad de interpretación de los resultados. Sin embargo, no hay que olvidar que debe haber una serie de información que permita al observador poder situarse espacialmente, aunque ésta sea estática.

1.3.4. Otras consideraciones a tener en cuenta en la evaluación de los resultados: el escenario de referencia.

En este capítulo, se ha explicado la importancia de cada una de las componentes de las medidas de la accesibilidad y cuál es el comportamiento de la componente de transporte, la relacionada con el transporte por carretera especialmente, como consecuencia del incremento de los flujos que requerían que algunos arcos de la red entre en congestión. Sin embargo, los resultados que se puedan obtener deben ser contextualizados no solo a la realidad de la zona de estudio y a las limitaciones que se han debido en los modelos empleados para hallar algunos valores, sino también deben ser referenciados a una situación o escenario de referencia que permita establecer las comparaciones adecuadas para estudiar

los efectos de los cambios en las distintas componentes de la medida de accesibilidad, ya sea por separado, en conjuntos o en subconjuntos.

La situación de referencia puede definirse desde la perspectiva de una situación que existió en el pasado o actual, siendo habitual en el caso de los estudios estratégicos, siendo usado en el caso de estudio del artículo cuarto. En este caso, se suele valorar el impacto de cada una de las propuestas y sus efectos en los diferentes escenarios alternativos. De la misma manera, se puede referenciar a valores obtenidos por estudios menos demandantes de recursos, como son los estudios estáticos, tal y como se usa en parte del quinto artículo.

Por otro lado, se puede establecer el escenario de referencia como escenario objetivo o por el cual se considera que el sistema usos del suelo – transporte – sociedad funciona de manera adecuada, similar al concepto de accesibilidad normativa de Páez et al (2012); esta situación suele usarse en los estudios de vulnerabilidades de las redes (Jenelius, 2009). En este último caso, varias precauciones deben ser consideradas en el momento de establecer el escenario de referencia o, en su defecto, ser conscientes de las implicaciones que este hecho puede acarrear y explicarlos adecuadamente a los posibles receptores de la información.

Como explica Litman (2014), considerar como escenario referencia el resultado de los valores con la red de transporte con rendimiento de flujo libre puede llevar a inducir el mensaje de que se deben tomar medidas para garantizar esta situación, provocando posibles planteamientos de soluciones que pueden afectar seriamente a otros sistemas y a la calidad de vida de las personas. Por ejemplo, en estudios anteriores como los realizados por Christidis e Ibáñez Rivas (2012), y Schrank, Eisele, y Lomax (2012) o los informes anuales de TomTom (2013b) e Inrix (2017) se valoran las consecuencias de la congestión directamente en relación con el escenario de la red completamente en flujo libre, o nivel de servicio A.

Pese a que el uso del escenario en flujo libre es completamente factible y real, su función como escenario de referencia puede ser controvertida. El uso de este escenario puede ser dar a entender, implícitamente, que el planificador o académico que estudia el caso considera que es el escenario de funcionamiento normal o deseado. Como buena práctica, los resultados obtenidos por el uso de la situación de la red en flujo libre deberían ser siempre entendidos como uno de los límites del intervalo de valores en el que se encontrará el resultado.

En esta tesis, los estudios realizados en los tres primeros artículos y parte del quinto artículo,

y comparaciones realizadas, hacen referencia a la situación de flujo libre. En diferentes secciones que conforman este documento se ha explicado que estos valores no deben ser tomados, necesariamente, como los valores objetivos de funcionamiento deseado de la red – o valores normativos en la componente transporte según Páez et al (2012), sino que su elección se debe a las siguientes razones técnicas y de correcto establecimiento del marco comparativo entre las diferentes áreas de estudio:

- Los resultados que se pueden obtener por algoritmos de rutas dinámicas cuando todas las rutas circulan siempre en flujo libre son idénticos a los que se pueden obtener con redes estáticas con valores de flujo libre en toda la red, reduciendo la necesidad de uso de recursos computacionales para obtener el resultado en este escenario.
- Permite conocer el valor mínimo de tiempo de viaje de cada relación origen-destino, sirviendo como valor de control y verificación de que el resto de resultados obtenidos son correctos: si se encuentra un valor inferior, es que la red tiene algún error a resolver. En consecuencia, con distribuciones de oportunidades estáticas y con la explotación del segundo axioma de Weibull (1976), el valor de la accesibilidad obtenido en este escenario el máximo.
- Permite establecer unos escenarios factibles de comparación entre diferentes áreas de estudio, ya que sea cual sea la distribución espacio-temporal de los flujos y la congestión, todas las redes pueden tener escenarios completamente en flujo libre, principalmente en horarios nocturnos.

1.4. Metodología, bases de datos y especificaciones de cálculo.

Una vez examinado el marco teórico y el estado del arte sobre el estudio de los rendimientos de los sistemas usos del suelo – transporte – sociedad mediante el uso de indicadores de accesibilidad, y tras haber comentado el reto que supone la incorporación de valores que cambian a lo largo de cada escenario que se pueda plantear en el estudio de la accesibilidad, se procede a establecer la metodología general, tanto de cálculos como de análisis, que se va usar en esta tesis con el fin de estudiar adecuadamente el cómo afecta la congestión y sus variaciones a la accesibilidad en diferentes entidades territoriales.

Pese a que para cada caso y/o según las fuentes de datos usadas puedan requerir la definición de unas especificaciones propias, se define una metodología común tanto a nivel de cálculo como de análisis. El esquema en este apartado, y que define cada caso de estudio, es similar al propuesto por Zhu y Liu (2004).

1.4.1. Metodología: el indicador de accesibilidad

Para la realización de la tesis se eligió usar un indicador basado en las medidas de accesibilidad potencial dinámica por localización de actividades zonal tal y como se define en la Ecuación 1.34, pero con simplificaciones que permiten establecer un marco comparativo adecuado para cada caso de estudio.

Este tipo de indicador, pese a obtener unos resultados que pueden resultar no intuitivos para el público en general debido a la naturaleza mixta de las unidades de su resultado y a que requiere de un poco más de explicación tal y como se ha comentado anteriormente, se ha considerado adecuado por ser el que mayor libertad de cálculo ofrece, el que puede incorporar explícitamente la ley de Tobler (1970) y cuyos resultados pueden ser estudiados mediante de la aplicación de los conceptos expresados en varios axiomas de Weibull (1976).

Cada caso de estudio requiere de una serie de modificaciones del indicador que son convenientemente explicadas en los siguientes párrafos. También hay que comentar que, en el caso de estudio del artículo primero, se usa otro indicador más intuitivo, tiempos medios de acceso a todas las oportunidades ponderados por el peso de cada oportunidad, junto al ya

mencionado y que es explicado en párrafos posteriores.

En cualquiera de los casos de estudio, se asume la hipótesis de que la probabilidad de interacción es constante en cada caso de estudio. Es decir, se define a la *función de disuasión según impedancia* como una función única y cuyos parámetros tampoco varían en cada caso de estudio. Esta decisión permite poder identificar directamente los cambios en la distribución de la accesibilidad y establecer el marco comparativo adecuado. Los cambios de los valores de la accesibilidad dependen exclusivamente de los cambios en la red de transporte por congestión u otros cambios, y en la localización de las oportunidades.

Todo el proceso de cálculo ha sido diseñado en diferentes módulos secuenciales, para poder ejecutar el mismo módulo o sucesivos de manera paralelizada, aunque cada módulo suele requerir los resultados del módulo anterior. Toda la investigación, desde el pretratamiento de datos, el cálculo de impedancias, de accesibilidad y el análisis de los resultados se ha realizado usando las herramientas disponibles en ArcGIS 10.x (creando módulos entre ellas también), Microsoft Excel, Adobe Illustrator CS3 y PhotoScape, así como módulos expresamente preparados para esta tesis en Python y R-Project. En el Anexo B se explica con detalle cada uno de los diferentes módulos programados y usados, cuando éstos representen trabajos que no se podían realizar con las herramientas existentes o se han unido varias de ellas para hacer cálculos más rápidos.

1.4.2. Las bases de datos usadas y tratamiento de datos

Para poder llevar a cabo la investigación planteada, es necesario el uso de bases de datos adecuadas, armonizadas⁴⁴ y que, dentro de los sesgos producidos por la metodología usada en la captación y procesamiento de los datos y otras limitaciones, puedan ser utilizadas para obtener resultados que sean concordantes con la realidad.

En el Anexo A, se presentan las fichas de las componentes *usos del suelo y transporte* de cada una de las áreas metropolitanas y países de los diferentes casos de estudio de esta tesis.

⁴⁴ Al trabajar con áreas de estudio de diferentes estados, con diferentes organismos encargados de realizar los trabajos de obtención de datos, es adecuado garantizar que los datos han seguido el mismo proceso de captación y proceso de los datos y, por lo tanto, que la calidad de los datos obtenidos es independiente al organismo que ha realizado los trabajos.

1.4.2.1. Bases de datos de la componente *transporte*

La temática de la tesis y la definición de los ámbitos de estudio ha requerido el uso de redes de transporte por carreteras de gran detalle, no sólo a nivel geográfico, de atributos y de definición de movimientos autorizados (giros), sino también a nivel temporal, informando del rendimiento observado/esperado en cada uno de sus arcos para cada período temporal predefinido.

Para los datos de la componente *transporte*, se ha usado los datos secundarios ofrecidos por la empresa de receptores de sistemas de navegación global por satélite TomTom®. Esta empresa ofrece dos productos útiles para el desarrollo de la tesis tanto por la tipología de datos, la metodología en la captación y procesamiento de datos como por la facilidad de establecer relación entre ellos.

Por un lado, el producto MultiNet®, que dispone la definición de las geometrías y atributos de diferentes elementos del territorio en distintos ámbitos geográficos, incluyendo redes de transporte. Por otro lado, el producto Historical Speed Profile®, o HSP por sus iniciales (TomTom, 2013a), es la base de datos que dispone de datos de velocidades medias de la red de carreteras agregados en periodos temporales de hasta 5 minutos.

Ambos productos están preparados para poder ser usado en SIG y obtener resultados de rutas mediante el uso de las herramientas de la extensión Network Analyst® de ArcGIS® Desktop. Para la correcta creación de las redes dinámicas en ArcGIS Desktop (*Network Dataset*) mediante el uso de ambos productos, se recomienda el uso de las herramientas Street Data Processing Tools (ArcGISTeamNetworkAnalyst, 2012). A continuación, sólo se describirán las principales bases de datos y atributos de ambos productos que requirió la herramienta Street Data Processing para la creación de las redes usadas en la tesis. Para más información sobre toda la información disponible en MultiNet®, consúltase (TomTom, 2015b) ⁴⁵.

1.4.2.1.1 MultiNet®

El producto MultiNet® contiene la cartografía e indicaciones que TomTom® emplea en sus navegadores. De este producto solamente es necesario el uso de los datos que hacen

⁴⁵ Las definiciones de las redes usadas en el presente trabajo corresponden a las versiones 4.6 y 4.7. Estas versiones no están disponibles en la red. Las diferencias entre versiones que afectan a los datos usados, solo afectan en la longitud reservada para algunos campos, o la aparición de algún nuevo campo. Todos estos cambios no afectan a la definición de las redes usadas en esta tesis.

referencia a la geometría de la red de carreteras (NW), geometría de las maniobras (MN), otros datos de las maniobras (MP), señales de información (SI) y rutas siguiendo señales informativas (SP) para la creación de las redes. A continuación, se detallan las principales características de estas bases de datos:

- La geometría de la red de carreteras – Network, Geometry with Basic Attributes (NW) es una *Feature Dataclass* de tipo polilínea cuyo trazo corresponde a los ejes de las calzadas de cada elemento real, preparado para poder ser usado en la creación del *Network Dataset* con conexiones de tipo *end points*⁴⁶, pese a que no cumple todas las reglas topológicas, especialmente con respecto a las intersecciones ficticias. Los vértices extremos de cada arco pueden corresponder a intersecciones reales, cuyos vértices extremos coinciden con las de otros arcos de otras calles o carreteras y que están en la misma altura, a puntos de cambio de atributos y/o entidad administrativa de una misma calle o carretera, o a intersecciones ficticias, en las que dos calles o carreteras discurren a alturas diferentes y, por lo tanto, un vehículo que circule por una de ellas no puede cambiar a la otra en ese punto. Un total de 50 atributos definen cada uno de los arcos de esta *Feature Dataset*, de los que se destacan por el uso de esta tesis los siguientes:
 - *ID (Feature Identification)*: identifica cada arco con un valor único. Permite establecer las relaciones con la información de giros y con los perfiles de velocidad de *Speed Profile*.
 - *FEATTYP (Feature Type)*: indica si el arco corresponde a un tramo de carretera, de trayecto en ferry apto para vehículos o peatones o si es una agregación de direcciones en polígonos residenciales o urbanizaciones.
 - *F_JNCTID (Start Junction Identification)* y *T_JNCTID (End Junction Identification)*: identifica los vértices de cada extremo del arco. La definición de estos puntos permite identificar adecuadamente el sentido del arco y sentidos de circulación
 - *METERS (Feature Length)*: longitud del arco en metros
 - *FRC (Functional Road Class)*: indica el tipo de vía que es, principalmente por características de la calzada. Cada tramo se clasifica en una de las 10 categorías siguientes:
 - -1: sólo agregación de direcciones o polígonos.

⁴⁶ Las rutas solo pueden cambiar de arco en los extremos del arco siempre y cuando tenga otro extremo de otro arco a la misma altura (ESRI, 2016)

- 0: Autopistas, autovías y otras carreteras principales.
- 1: Carreteras principales de menor importancia que autopistas.
- 2: Otras carreteras principales.
- 3: Carreteras secundarias.
- 4: Carretera local de conexión
- 5: Carretera local de gran importancia
- 6: Carretera local
- 7: Carretera local de menor importancia
- 8: Otras carreteras
- *NET2CLASS (Net 2 Class)*: indica a que nivel de jerarquía de la red pertenece cada tramo de la red.
- *NAME (Official Street Name or Route Number)*: indica el nombre oficial de la calle o carretera.
- *SHIELDNUM (Route Number or Shield)*: indica el código de la carretera.
- *FOW (Form of Way)*: indica que tipo de calzada es, cada tramo pertenece a una de las siguientes categorías:
 - -1: no aplicable
 - 1: parte de autopista.
 - 2: parte de calzada con más de un carril por sentido que no es autopista.
 - 3: parte de calzada con, como mínimo, un carril de circulación por sentido.
 - 4: parte de una glorieta o rotonda.
 - 6: parte de un aparcamiento
 - 7: parte de un aparcamiento de diferentes niveles (subterráneo o en edificio).
 - 8: parte de una plaza para aparcamiento sin definición de plazas de aparcamiento.
 - 10: parte de una vía de incorporación.
 - 11: parte de una vía de servicio.
 - 12: entrada o salida de una zona de aparcamiento.
 - 14: parte de una zona peatonal.
 - 15: parte de una acera.
 - 17: zonas de tráfico especial.

- 18: parte de una galería (tiendas).
- 19: escaleras.
- 20: carreteras para autoridades.
- 21: conector.
- 22: cul-de-sac.
- *CONSTATUS (Construction Status)*: indica si el arco pertenece a un tramo en construcción en ambos sentidos (N), sólo en un sentido (FT si está en construcción del nodo origen al nodo destino, o TF si está en construcción del nodo destino al nodo origen⁴⁷), o está plenamente operativa (sin valor).
- *ONEWAY (Direction of Traffic Flow)*: indica que sentidos de circulación están abiertos al tráfico. Si se puede circular en ambos lados, el campo está vacío; si solo se puede circular del nodo origen al nodo destino, el campo es FT; si solo se puede circular en sentido contrario, el campo es TF; si no se puede circular en ninguno de los dos sentidos, el campo es N.
- *F_ELEV (Begin Level) y T_ELEV (End Level)*: indica la elevación del nodo origen y del nodo destino. Necesario para saber que otros arcos pueden ser usados llegando de ese arco (intersección), y cuales no (intersecciones ficticias).
- *KPH (Calculated Average Speed)*: velocidad media calculada según unos criterios de normalización que considera: si existen de limitaciones de velocidad por carril, si discurre por suelo urbano, y los valores definidos por los campos FRC y FOW.
- *MINUTES (Travel Time)*: valor obtenido de dividir el campo METERS con el campo KPH, con las conversiones de unidades adecuadas para obtener el resultado en minutos.
- La geometría de las maniobras – *Maneuvers, Geometry and basic attributes (MN)*, es una *Feature Dataclass* del tipo polilínea que hace referencia al tipo de maniobra que se puede realizar en cada intersección. Se relaciona con la *Feature Dataset* a partir del campo (ID). El trazo resultante incluye al menos una parte de los arcos implicados en la maniobra. Las maniobras se clasifican en 6 categorías siendo el campo FEATTYP (*Feature Type*) el que contiene la categoría de cada maniobra:
 - 9401: Bifurcación
 - 2104: Maniobra con prioridad

⁴⁷ Ver campos *F_JNCTID* y *T_JNCTID*. FT se puede leer como From-To, y TF como To-From. Los códigos son iguales para el campo *ONEWAY*.

- 2103: Maniobra prohibida
- 2102: Maniobra restringida
- 2101: Maniobra calculada/derivada prohibida
- 2199: Maniobra imagen
- La tabla de Otros datos de las maniobras – *Maneuver Path Index* (MP) se relaciona con la *Feature Class* mediante el campo ID en ambos casos. En esta tabla se indica el arco de la red NW que está implicado en la maniobra mediante la unión de tablas del campo TRPELID (MP) con el campo ID (NW). También se indica el orden de la participación de cada arco en la maniobra, campo SEQNR.
- Las tablas rutas siguiendo señales informativas - Singpost Path Index (SP) y señales de información - Signpost Information (SI), son necesarias para la construcción de la red mediante el uso de las herramientas de Street Data Processing Tools. Sin embargo, éstas no son necesarias para el desarrollo de la tesis. La introducción de estas tablas permite indicar qué señales orientativas se encontrarán a lo largo de las rutas obtenidas.

1.4.2.1.2 Historical Speed Profiles®

Por el otro lado, los datos del producto Historical Speed Profiles® se obtienen de los datos reportados por los diferentes navegadores de TomTom® que usan cada arco de la red de carreteras, método *Floating Car Data*, en el periodo de 8 trimestres anteriores al correspondiente al de la publicación (TomTom, 2015a). De estos datos se obtienen valores medios tras la limpieza de datos anómalos debidos a, por ejemplo, periodos con afecciones en el tráfico por accidentes, climatología u obras de corta o media duración. Es decir, los resultados hacen referencia a la congestión recurrente.

Nótese que el uso de este producto de rendimiento de redes en el pasado para estudios de accesibilidad conlleva que el indicador de accesibilidad y los resultados de los casos de estudios se enmarquen dentro valores de la componente transporte *positiva*; es decir, percibida según su valor medio para cada intervalo de estudio, propuesta en Páez et al. (2012)

Para todo arco con al menos 1.000 observaciones para cada 5 minutos en cada día de la semana, se define un perfil de velocidad y se indicarán sus valores medios; en caso contrario, sólo se indicarán valores medios observados⁴⁸. Las observaciones se forman a partir de la

⁴⁸ Estos valores han sido comentados en varias conferencias realizadas por TomTom, no pudiendo referenciar documentos.

correcta asignación de la localización según GPS de cada punto de cada ruta a un arco de la red. Para ello, se realizan procesos de asignación de puntos a los arcos de manera similar a la metodología usada en Quiroga (2000) y en Møller-Jensen, Kofie, & Allotey (2012).

En el caso de obtener un perfil de velocidad, el arco se asigna a uno de los perfiles predefinidos previamente por TomTom® según la similitud entre el perfil predefinido (Figura 1.12) y el perfil obtenido. Con este proceso se consigue reducir la dimensionalidad de los posibles resultados y se ahorra memoria.

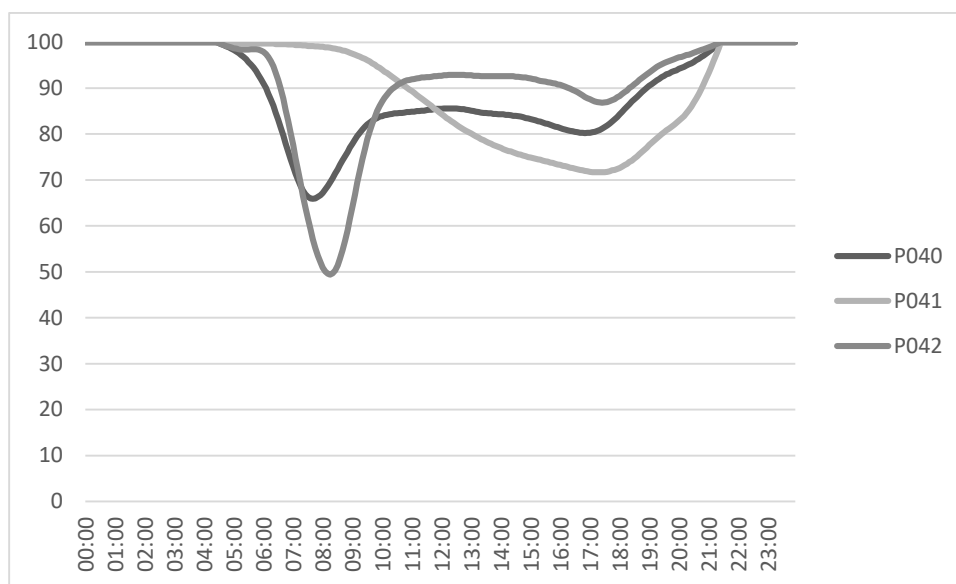


Figura 1.12. Ejemplo de perfiles de velocidad. En el ejemplo los perfiles 40, 41 y 42 de la versión 1 de HSP.

Pese a que no ha sido posible encontrar documentación de TomTom cual la velocidad media que usa, una interpretación del documento de patente de navegación con perfiles de velocidad normalizados de TomTom (EP 2963389 A1, 2008) parece indicar que la velocidad media que se reporta en esta base de datos puede ser la velocidad media espacial (Ec. 1.24). Este valor se menciona que se usan tiempos y distancias para obtener esos valores, siendo explícitamente explicado el uso de la velocidad media espacial (media armónica) en el procedimiento de obtención de la velocidad media de categorías de vías. Sin embargo, el mismo documento reconoce que el valor del perfil de velocidad puede ser la media aritmética (temporal), armónica (espacial) o el uso del valor mediano.

De acuerdo con los valores ofrecidos en los diferentes productos HSP usados para esta tesis,

se observa que en los días laborables se tiene el mayor número de kilómetros con perfiles de velocidad, siendo esta cantidad la misma para todos los días de este conjunto. Los sábados el número de kilómetros con perfil de velocidad decae, sobre todo en los arcos de menor categoría, y finalmente los domingos son los días con menos kilómetros de red con perfiles de velocidad, aunque su valor es ligeramente inferior al de los sábados.

Los datos de HSP se dispone en dos tablas diferentes:

- La tabla de unión de perfiles de velocidad a arcos de la red (HSPNP) o Network Profile Link Table es la que contienen la información de velocidades observadas de cada arco y sentido de la red (NW). Esta tabla contiene los siguientes campos:
 - *NETWORK_ID (Network Feature Identification)*: hace referencia al campo ID de la Feature Class de geometrías de la red (NW).
 - *VAL_DIR (Validity Direction)*: indica el sentido del arco para el que es válido los datos del registro, siendo 2 en sentido vértice inicio del arco a vértice final y 3 en sentido contrario.
 - *SPFREEFLOW (Freeflow Speed)*: indica la velocidad observada en situaciones de flujo libre en km/h. Esta velocidad puede ser superior a la velocidad legal. El campo es NULL si no hay ningún perfil asignado.
 - *SPWEEKDAY (Weekday Speed)*: indica la velocidad media observada en los días laborables en km/h.
 - *SPWEEKEND (Weekend Speed)*: indica la velocidad media observada en los días de fin de semana en km/h.
 - *SPWEEK (Week Speed)*: indica la velocidad media observada en km/h en los días de la semana.
 - *PROFILE_1*: indica el número del perfil de velocidad para los domingos. Si no hay perfil asignado para ese día se indica con 0 (si hay otros días con perfil) o NULL (ningún día tiene perfil)
 - *PROFILE_2*: indica el número del perfil de velocidad para los lunes. Si no hay perfil asignado para ese día se indica con 0 (si hay otros días con perfil) o NULL (ningún día tiene perfil)
 - ...
 - *PROFILE_7*: indica el número del perfil de velocidad para los sábados. Si no hay perfil asignado para ese día se indica con 0 (si hay otros días con perfil) o NULL (ningún día tiene perfil)

- La tabla de definición de perfiles de velocidad (HSPR) o Historical Speed Profiles define cada uno de los perfiles predefinidos de velocidad a los que se puede asignar cada arco según su perfil de velocidad observado. Cada perfil se define en intervalos de 5 minutos, siendo 288 para un día. Esta tabla es idéntica para los datos que tienen la misma versión de valores de HSP. Los campos son:
 - *PROFILE_ID (Profile Identification)*: indica el identificador del perfil usado en los campos PROFILE de la table HSNP.
 - *TIME_SLOT*: indica el tiempo inicio (en segundos transcurridos desde medianoche) en el cual la velocidad relativa indicada en el mismo registro es efectiva para ese perfil. Este valor es válido para los siguientes 5 minutos.
 - *rel_sp (Relative Speed in % of Freeflow Speed)*: indica el porcentaje de la velocidad máxima que se desarrolla en los tramos con ese perfil para el periodo de 5 minutos que se inicia según el campo TIME_SLOT.

En la tesis se ha considerado que los valores que se reportan en esta base de datos son adecuados para el desarrollo de la misma sin poder haber realizado una comparativa con otras posibles fuentes de datos, puesto a que esta comprobación podría superar el objeto de estudio de la tesis y al difícil acceso a otras fuentes comparables. Sin embargo, el trabajo de Gwara (2017)⁴⁹ en seis tramos diferentes de dos autopistas entre Johannesburgo y Pretoria en Sudáfrica ha mostrado que la forma del perfil para cada caso es muy similar entre los datos de TomTom y los ofrecidos por la autoridad del transporte correspondiente, aunque el valor de TomTom tiende a ser menor, excepto en las horas de flujo libre.

1.4.2.1.3 Los Network Dataset de la tesis

Para realizar los artículos que componen la tesis, se han usado 3 versiones diferentes de los datos de TomTom®, según el objeto de estudio de cada uno de ellos. Se ha dispuesto de los de la versión 2013Q1 para Alemania (DE), España (ES), Francia (FR), Italia (IT) y Reino Unido (GB), y de los datos de las versiones 2011Q3 y 2014Q3 para los Países Bajos (NL) que se usan para crear 7 *Network Datasets*. En la Tabla 1.4 se puede observar el cronograma de captación de datos para HSP para cada una de las versiones.

La definición temporal de la red MultiNet® es la que da nombre a las versiones, pudiendo haber cambios entre ellas debido a la apertura de nuevas vías, cambios de atributos y

⁴⁹ Nótese que mientras los datos de TomTom hace referencia a 24 meses, la base de datos comparativa usada por Gwara es solo de 1 mes, de manera que los resultados pueden estar influenciados por el tráfico estacional.

correcciones geométricas de los arcos, cambios de categoría de cada arco o cambios de sentidos de circulación permitida entre otros.

Respecto al producto HSP, las versiones 2011Q3 y 2013Q1 usan la primera versión de definiciones de perfiles, que predefine 98 perfiles de velocidad y cuyos porcentajes de velocidad pueden ser inferiores al 100% de la velocidad en flujo libre entre las 04.30 y las 21.20. La versión 2014Q3 usa la segunda versión del producto HSP, con 293 perfiles predefinidos y las velocidades pueden ser inferiores al 100% entre las 04.00 y las 21.50. No se halló una relación única para gran parte de los perfiles de ambas versiones.

Pais	Art	09 Q1	09 Q2	09 Q3	09 Q4	10 Q1	10 Q2	10 Q3	10 Q4	11 Q1	11 Q2	11 Q3	11 Q4	12 Q1	12 Q2	12 Q3	12 Q4	13 Q1	13 Q2	13 Q3	13 Q4	14 Q1	14 Q2	14 Q3	14 Q4
DE	3									C	C	C	C	C	C	C	C	E							
ES	1, 3,5									C	C	C	C	C	C	C	C	E							
FR	3									C	C	C	C	C	C	C	C	E							
GB	2,3									C	C	C	C	C	C	C	C	E							
IT	3									C	C	C	C	C	C	C	C	E							
NL	4			C	C	C	C	C	C	C	C	E				C	C	C	C	C	C	C	C	E	

Tabla 1.4. Cronograma de la captación de datos de velocidades para cada país realizada por TomTom (C = Captación, E = Entrega y geografía de la red según MultiNet®).

Además, no se dispone de los datos en bruto para poder hacer la reasignación según una única versión de HSP. Sin embargo, en los perfiles que se pudo establecer esta relación, se observa que las principales discordancias se encuentran en los periodos temporales próximos a las 04.00-04.30 y 21.20-21.50, cuando los perfiles deben abandonar o volver a alcanzar el 100% de la velocidad en flujo libre.

Para la generación de cada Network Dataset se ha usado las mismas definiciones de parámetros en todas ellas para poder ser redes cuyos resultados no introduzcan sesgos por localismos y diferencias de definiciones. Las principales características de éstas son:

- Se excluyen áreas que solo son accesibles al resto de la zona de estudio mediante ferris.
- Sólo existe una fuente de datos de los arcos para cada Network Dataset, la que corresponde a MultiNet®
- Se establece conexiones del tipo *end points* y se tiene en cuenta el valor de la altura de los vértices extremo mediante los campos *F_ELEV* y *T_ELEV*.

- Sólo se trabaja con los arcos que son del tipo (*FEATTYP*) tramo de carretera.
- Se eliminan los arcos que pertenecen a las categorías de vía (*FRC*) tipo -1, 7 y 8.
- En la definición de la red se tiene en cuenta la posibilidad de indicar el uso o no de los sentidos de circulación.
- Se han incluido los giros prohibidos. Éstos junto con la definición de sentidos de la calle impiden realizar movimiento no permitidos.
- Se eliminan aquellos giros que incluyen algún arco que ha quedado excluido por los dos puntos anteriores.
- Se ha garantizado que la red resultante por los criterios anteriores tenga conexión topológicamente correcta, es decir, al menos existe un camino para ir de cualquier zona *i*-ésima a cualquier zona *j*-ésima. Este criterio se cumple tanto cuando cada zona de estudio hace de zona de origen como de zona de destino⁵⁰. En caso de no conseguirlo, se ha modificado el sentido de circulación a apto en ambos sentidos del menor número de arcos posibles para conseguir el criterio de conexión⁵¹.
- La determinación de la red de jerarquía a la que pertenece cada tramo de la red para el uso de algoritmos heurísticos de jerarquía de redes se calculan según se especifican en la Tabla 1.5.

Jerarquía	Valor NET2CLASS
Red primaria	{0,1,2}
Red secundaria	{3,4}
Red local	{5} o superior

Tabla 1.5. Asignación de cada arco a jerarquía de Network Dataset.

- No se ha modificado ninguno de los productos HSP.
- Se definen los siguientes valores de impedancia:
 - *AverageTravelTime*: es la impedancia de red estática considerando los tiempos que se obtienen con las velocidades medias observadas de cada arco a lo largo de la semana según el producto HSP.
 - *Kilometers*: es la impedancia de longitud de la red. Genera una red estática
 - *Minutes*: es la impedancia de red estática considerando los tiempos que se obtienen con las velocidades calculadas en el producto MultiNet®.
 - *TravelTime*: es la impedancia de red dinámica considerando la variación de

⁵⁰ La ubicación del centroide en la red para cada caso de estudio se explica en la sección 1.4.3. Se debe entender que la no conexión implica que, aunque se han aplicado correctamente los criterios de ubicación, por definición de la red la zona no es accesible.

⁵¹ Sólo se garantiza que son redes conexas para la definición de zonas origen o destino usadas en cada estudio de esta tesis.

velocidad en los arcos con perfil de velocidad. En caso de no disponer de perfil de velocidad, se usará el valor medio para el tipo de día que se calcula. Es decir, velocidad media en día laboral de lunes a viernes y velocidad media en fin de semana para sábado y domingo. Estas velocidades proceden del producto HSP.

- *WeekdayFallbackTravelTime*: es la impedancia de red estática considerando los tiempos que se obtienen con las velocidades medias observadas de cada arco para los días entre semana según el producto HSP.
- *WeekendFallbackTravelTime*: es la impedancia de red estática considerando los tiempos que se obtienen con las velocidades medias observadas de cada arco para los días entre semana según el producto HSP.

1.4.2.1.4 Las otras posibles bases de datos de la componente transporte

Finalmente, también se valoró el uso de otras fuentes de datos para el uso estudio de la tesis, estableciendo comparaciones de fiabilidad de estas otras fuentes de datos en relación a los datos de TomTom®. Por un lado, se consideraron los proyectos abiertos Open Street Map (OSM) (OpenStreetMap Foundation, 2005) u Open Transport Map (OTM) (Jedlička et al., 2016), que permiten la descarga de los datos de las redes para cualquier entorno europeo.

Los atributos y otras informaciones relacionadas de las redes obtenidas en estos proyectos no suelen tener los niveles definición y de garantías requeridos para calcular cada caso de estudio de esta tesis, en parte por provenir de procesos colaborativos⁵², debiendo realizar trabajos de corrección y normalización que exceden el objeto de estudio de la tesis. Además, estos proyectos no permiten conocer directamente la observada variación del uso de los arcos de la red, debiendo encontrar otras fuentes de datos que contenga estos datos, como por ejemplo las campañas de aforos, con las limitaciones que ello conlleve⁵³.

Otra alternativa posible es el uso de los resultados que se pueden obtener a través de la API de Google Maps. Esta opción, que permite incorporar la variación temporal de la red y obtener las matrices origen/destino de menor coste para cada relación y para el periodo de salida o de llegada deseado, presenta una serie de limitaciones en cuanto al número de peticiones a

⁵² En el caso de OSM, pese a existir iniciativas y manuales de normalización de los datos, cada usuario tiene libertad de definir cada elemento a su manera y de rellenar la cantidad de atributos que deseé. En el caso de OTM, pese a presentar la información normalizada, está depende en gran medida de la calidad de los datos originales de OSM.

⁵³ Por ejemplo, según la página de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid (2016), se disponen de más de 3.600 puntos de medida de velocidad (carreles) en todo el término municipal de la villa. TomTom® dispone de 60.815 arcos con perfiles de velocidad.

realizar cada día, el número de puntos OD máximo en cada petición (Google, 2017b), el uso y tratamiento de la información (Google, 2017a), y que todos los cálculos deben hacerse vía API, limitando el conocimiento que se puede tener de la red que se usa y el control de los posibles escenarios de cálculo al no disponer de los archivos para SIG (uso permitidos de cada tipo de vía o modificación de los elementos para observar posibles efectos).

Al finalizar la redacción de la tesis, el autor ha conocido que dispone de acceso a la API de INRIX© por un periodo limitado de 30 días, como cualquier otro usuario que así lo solicite.

1.4.2.2. Bases de datos de la componente *usos del suelo*

En la tesis, se han utilizado tres bases de datos diferentes de la componente de *usos de suelo* según su idoneidad para cada caso de estudio. Cada base de datos define los límites administrativos de cada zona del área de estudio y la cantidad de oportunidades de las que disponen. Además, en alguno de los casos, se ha requerido del uso de otras bases de datos para definir la localización del centroide que representará a cada una de las zonas de estudio, y que será desde el que se conecte cada zona con la componente *transporte*. Todos estos valores se enmarcan dentro de la categoría *positiva* (Páez et al., 2012), puesto a que es la distribución observada de oportunidades.

1.4.2.2.1 Los datos de Europa

La primera base de datos a usar en esta tesis corresponde a los datos secundarios referentes a la distribución de la población según Eurostat, referente al año 2006 (Eurostat, 2012), usada en los artículos 1 y 2, y al año 2011 (Eurostat, 2016a), usada en el artículo 3, para toda la EU y otros países europeos basada en la definición de la malla cuadrada de 1km² definida por la Agencia Europea del Medioambiente (European Environment Agency, 2007; Peifer, 2011).

Estos datos se agregaron formando cuadrados de 4km² con el fin de reducir el número de zonas OD con las que se calcula los valores de accesibilidad para diferentes horas del día, tal y como se explica en la siguiente sección. Esta agregación se realizó para todo el territorio de Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido. Aún con esta agregación, el nivel de detalle obtenido es mayor que para la mayoría de las delimitaciones administrativas disponibles en cada área metropolitana en su conjunto. La agregación en ambos años fue la misma, puesto a que la definición de la malla no fue cambiada de una versión a la otra. El centroide de las zonas OD hace referencia al centroide geométrico del cuadrado que representa cada zona.

El centroide también marca el municipio al que pertenece la zona.

Con los datos de la distribución de población de 2006 en las celdas se definieron las áreas metropolitanas de tres casos de estudios de la siguiente manera: todo algún municipio, o Local Administrative Unit 2 (LAU2) (Eurostat, 2011) del área urbana funcional o *Functional Urban Area* (FUA) (ESPON, 2014a) del municipio principal, aquellos de otras FUAs rodeadas por la FUA del municipio que da nombre al área de estudio, y que tengan al menos el 50% en el interior de la isolinia de densidad 500hab/km² que contuviese el municipio principal del área. Esta isolinia es creada por la herramienta *Kernel Density* de ArcGIS considerando un radio de búsqueda de 10.000m y con una salida de datos en celdas de 500m.

El uso de mallas cuadradas permite evitar parte de los problemas del MAUP (Kwan & Weber, 2008) o la de no estar sus zonas afectadas por cambios en las delimitaciones administrativas. Además, permite expresar los datos en valores absolutos, ya que la propia división normaliza estos valores y no requiere de otras normalizaciones numéricas, como puede ser el expresar los valores en términos de densidad. Como lado negativo, cuanto mayor es el área que abarca cada cuadrado de la malla, mayor posibilidad de mezclar usos de suelos; este hecho puede hacer que estas zonas no sean adecuadas para poder realizar prognosis al no cumplir alguno de los criterios de delimitaciones propuestos a lo largo de la historia y que se pueden listar en Martínez, Viegas, y Silva (2009).

Sobre el uso de la distribución de la población como valor de la componente *uso del suelo*, se intentó encontrar una fuente de datos armonizada para todos los países con otros valores como podría ser el empleo o el Producto Interior Bruto (PIB) a un alto nivel de desagregación, pero no se encontró ninguna base de datos que cumpliera los requisitos. La base de datos más parecida a lo buscado es la elaborada por Milego y Ramos (2013). Sin embargo, ésta es otra forma de representar los valores de población anteriormente descritos y usados en tres casos de estudios de esta tesis puesto que el valor obtenido en cada cuadrado corresponde a la multiplicación entre la población y el PIB per cápita de la zona a la que pertenece dicho cuadrado.

1.4.2.2.2 Los datos de los Países Bajos

La segunda base de datos corresponde a los datos de la distribución de la población y empleo de los Países Bajos para los años 2009 y 2014, según los 4.035 códigos postales de 4 cifras, o *PostCode 4 cijfers* en neerlandés, (PC4) del año 2010 facilitada por la Universiteit van

Twente. De éstos, 4.010 PC4s no pertenecen a islas cuya única conexión es el ferry. Esta base de datos ha sido usada en el caso de estudio del artículo 4. Cada PC4 pertenece íntegramente a un único municipio, habiendo un total de 426 municipios que no estuviesen íntegramente en islas.

A diferencia de la base de datos anterior, ésta ha requerido un mayor objeto de limpieza y tratamiento de datos para poder ser usados correctamente debido a cambios administrativos tanto en los PC4s como en los municipios (LAU2).

Los valores de la distribución del empleo de 2009 y 2014 se han obtenido directamente de la base de datos secundarios del sistema de información nacional de puestos de trabajo, o *Landelijk Informatiesysteem van Arbeidsplaatsen* (LISA) en neerlandés (Stichting LISA, 2016). Estos datos se pueden obtener desagregados a nivel de dirección postal de cada empleo, indicando el sector económico al que pertenece la actividad principal de la empresa según código estándar de empleo de 2008, o *Standaard Bedrijfsindeling 2008* (SBI08)⁵⁴ en neerlandés (Statistics Netherlands, n.d.), el número de empleos y de trabajadores según puesto y género.

Las direcciones postales de los datos del año 2009 usan la versión 2010 de los PC4s, de manera que la agregación es directa. Para los datos de 2014, las direcciones se referencian a la versión 2015 de los PC4, los cuales se caracterizan principalmente por dividir algunos PC4 de las versiones anteriores. En este caso se ha realizado un trabajo de reasignación de valores a los PC4 versión 2010 en los casos que ha hecho falta. Nótese que la base de datos LISA puede agregar todos los empleos de empresa a una localización, el de la sede de la misma, aunque estos puedan estar en varias localizaciones del país. Sin embargo, se ha considerado que dicha base de datos es una aproximación adecuada de la distribución espacial de los empleos.

La distribución de población para ambos años ha sido obtenida de las respectivas mallas de 100m x 100m de población proporcionadas por la Oficina Central de Estadística de los Países Bajos, o *Centraal Bureau voor Statistiek* (CBS) en neerlandés, (Statistics Netherlands, 2015). Estas celdas contienen información sobre el total de habitantes en cada uno de los cuadrados, de cuantos son hombres, cuantos son mujeres, y de las edades por grupos de sus habitantes, tanto en total como por género. Los valores de estas mallas se han asignado a cada PC4

⁵⁴ Sigue la normalización del NACErev2 (European Commission, n.d.)

versión 2010 según la proporción de superficie de cada cuadrado de la malla en tierra que intersecta con cada PC4.

Los valores de empleo y población de 2009 se utilizan para la ubicación del centroide en cada uno de los PC4, y evitar que en PC4 muy extensos, el centroide tuviese se conectará en la red en un lugar poco representativo de su realidad. Para ello se han considerado dos categorías diferentes: si la relación entre empleos y habitantes en el PC4 es inferior a 2,2⁵⁵ o dónde al menos 0,5 empleos por habitante sean en el sector servicios, el centroide se calcula como el centro de masas obtenido de la distribución de población de la malla de 100m x 100m del PC4. En caso contrario, el centroide corresponde al centroide geométrico del PC4. En ambos casos se ha impuesto que dicho punto debe estar en el interior del PC4 correspondiente; es decir, si el cálculo cae fuera del PC4, el centroide se reubicará al punto más cercano del centroide real dentro del polígono del PC4.

1.4.2.2.3 Los datos dinámicos de Madrid

La tercera base de datos de la componente usos del suelo usada en la tesis en el artículo 5 es una aproximación al uso de cada zona del área metropolitana de Madrid según la hora de los días típicamente laborables, es decir, para martes, miércoles y jueves, mediante el estudio de la distribución espacio-temporal de los mensajes de la red social Twitter®, llamados tweets y que representan datos primarios, desde enero de 2012 hasta diciembre de 2013. En este caso, la entidad espacial que se usa como zonas OD son las 1.171 zonas de transportes⁵⁶ definidas por el Consorcio Regional de Transportes de Madrid (CRTM) para el año 2013. Esta división territorial agrega en las mismas unidades espaciales aquellos usos del suelo que tienen características similares desde la perspectiva de la movilidad.

Para obtener el uso de cada zona de transporte se deben transformar los tweets en usuarios, puesto a que el valor de interés son personas, aquí aproximadas a usuarios de Twitter, que usan cada zona de transporte a lo largo del día. En total, se encontraron 5.546.200 tweets para los tres días de la semana usados en el estudio, que permitieron dibujar la Figura 1.13, en la que se observa la evolución temporal del número de usuarios activos cada 15 minutos para toda el área metropolitana de Madrid.

⁵⁵ El valor medio de 2009 es de 0,4932 empleos/habitante. El valor 2,2 empleos/habitante representa el percentil 95.

⁵⁶ No hay que confundir la definición de zonas de transportes que define el CRTM para sus estudios, con definición de zonas de transporte que se usan a nivel de tarificación a los usuarios.

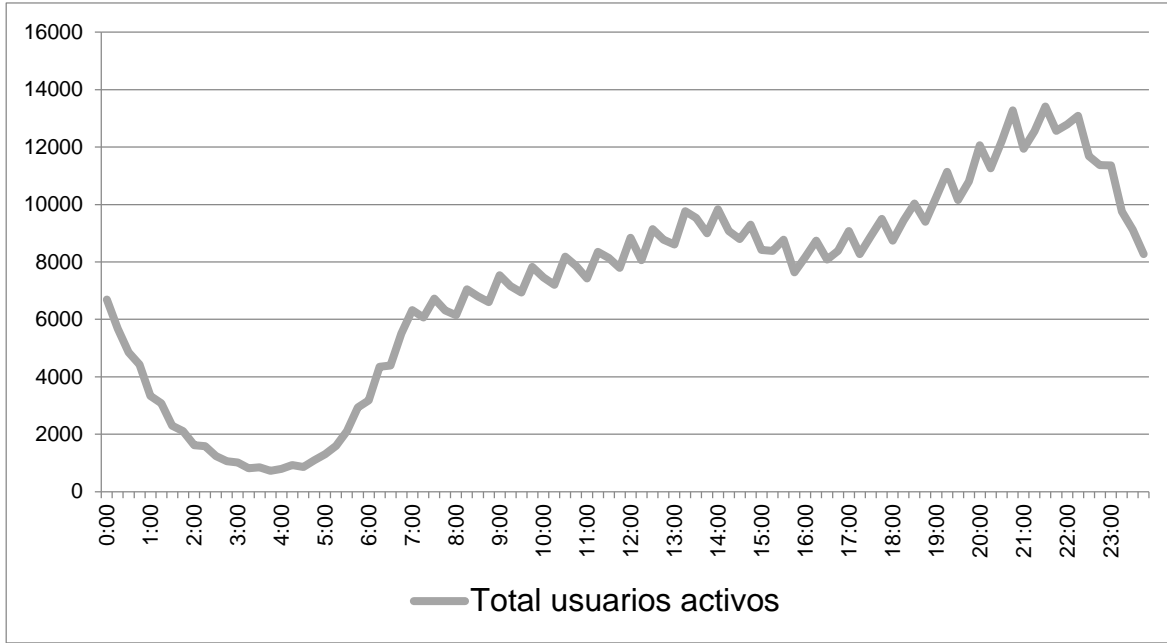


Figura 1.13. Evolución temporal del total de usuarios de Twitter en activo el área metropolitana de Madrid cada 15 minutos.

Los valores obtenidos requieren de una doble normalización para que los resultados obtenidos a partir del cambio de la distribución de las oportunidades sean comparables entre ellos.

- La primera normalización a realizar consiste en la eliminación de efectos cíclicos de corta duración en la presencia de usuarios en cada zona mediante el uso del valor de la media móvil centrada, tal y como se muestra en la Ecuación 1.35.

$$\overline{users}_j^t = \frac{\sum_{y \in [t-\tau, t+\tau]} users_j^y}{|[t-\tau, t+\tau]|}, \forall t \in P, \quad \text{Ec. 1.35}$$

En donde, \overline{users}_j^t es el valor de la media móvil central de usuarios de la zona j -ésima para el periodo de tiempo t -ésimo, $users_j^y$ es el valor de usuarios de la zona j -ésima para el periodo y -ésimo, τ es el incremento o decremento del tiempo que define los límites superior e inferior del intervalo a considerar para el cálculo de la media móvil centrada, en este caso de 30 min, $[t-\tau, t+\tau]$ es el intervalo en el que se encuentran los valores de la media móvil, $|[t-\tau, t+\tau]|$ es el número de valores a considerar, y P es el conjunto de periodos de estudio. Nótese que, en este caso, el número de

valores a considerar es 5.

- La segunda normalización consiste en considerar que la suma total de usuarios en cada periodo de tiempo es la misma, independientemente del número de usuarios realmente activos que se haya contabilizado, según la Ecuación 1.36. De esta manera, el valor de los diferentes valores de accesibilidad son resultado del movimiento de usuarios por el área de estudio y no por una mayor concentración de actividad en Twitter.

$$\overline{users}_j^t = \frac{\overline{users}_j^t}{\sum_{j \in N} \overline{users}_j^t} \cdot cte, \forall t \in P \quad \text{Ec. 1.36}$$

En donde, \overline{users}_j^t es el valor normalizado de la media móvil de usuarios de la zona j -ésima para el periodo de tiempo t -ésimo, y cte es el valor constante de población para todos los periodos temporales, en este caso, se estableció en 100.000 usuarios.

Las ecuaciones anteriores también fueron usadas para obtener el valor medio de las oportunidades de cada zona y normalizado a 100.000 usuarios. En este caso, se obtiene de la Ecuación 1.35 un único valor por cada zona, siendo este el valor medio de usuarios sin normalizar. Posteriormente, al aplicar la Ecuación 1.36, se obtuvo el valor necesario para conocer el valor medio que permite realizar comparaciones con el resto de escenarios calculados.

La localización del centroide de cada zona corresponde, en el caso de que la zona de transporte tenga más de un cuadrado de la malla, al centro de masas obtenido de la malla de 1km por 1km con la población del censo de 2011 (INE, 2016)⁵⁷. En caso contrario, se define el centroide de la zona como el centroide geométrico. En ambos casos se impone la condición de que el centroide debe estar localizado en el interior de la zona de transporte a la que corresponde.

⁵⁷ Tanto los datos de población de la malla INE como Eurostat corresponden al censo de 2011. Sin embargo, debido a la aplicación de diferentes criterios de agregación de los datos, por ejemplo, por la aplicación del secreto estadístico o el que los resultados del INE sean siempre múltiplos de 5, hacen que los resultados de estas mallas pueden ser diferentes. Para el caso de la Comunidad de Madrid se contabilizó 33.211 habitantes más en la malla Eurostat que en la malla del INE, siendo el valor menor el proporcionado por el INE, salvo en los casos en los que el redondeo a valor divisible a 5 requería sustraer 1 o 2 personas.

1.4.2.3. Bases de datos de la componente *individual*

La componente *individual* ha sido incorporada en los casos de estudio de esta tesis mediante la definición de tres *funciones de disuasión según impedancia*. En cada caso de estudio, se usa solamente una función única, lo que significa que se considera que todos los individuos son considerados iguales, independientemente de sus características socioeconómicas, y que la posibilidad de realizar la interacción es independiente al periodo del día que se inicia/finaliza el viaje.

La primera función, llamada en esta sección IDF-a, ha sido usada en el primer, segundo y tercer artículo, cuyos casos de estudios son ámbitos urbanos. Se calculó con el método de calibración de funciones empíricas-tripproporcionales y aproximación a una función exponencial negativa.

Para ello se usó, por un lado, los volúmenes agregados de viajes entre los diferentes municipios de las áreas metropolitanas de Madrid y Barcelona⁵⁸, de los datos de la Estadística de Movilidad Obligada (EMO), es decir, la movilidad que se realiza por motivos de trabajo o estudios, según el censo de 2001, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) de España (INE, 2004).

Por el otro, se calcularon los tiempos de viaje en coche con la red de TomTom® en tiempo medio observado, explicada en la sección 1.4.2.1., a cuyos resultados se les aplicó un factor de corrección de 1,1 para indicar excluir de manera general tramos nuevos o mejoras en la red que no estaban realizados en 2001. Las restricciones de cálculo de estas rutas son iguales a las empleadas en los casos de estudio y explicada en la sección 1.4.3. Las relaciones se dividieron en 20 grupos de 5 minutos cada uno de ellos, excepto el último grupo que contenía todas las relaciones con tiempos de viajes excesivos.

En este caso se excluyeron los viajes internos, es decir, los que se realizan dentro de un mismo municipio. El de valor R^2 entre los flujos de viajes de cada relación según la EMO y los obtenidos por el proceso de calibración es de 0,9608. La función resultante fue la expresada en la Ecuación 1.37:

$$f(c_{ij}) = e^{-0,065 \cdot c_{ij}} \quad \text{Ec. 1.37}$$

⁵⁸ Véase anexo A.

La segunda función, la función IDF-b, se usó en el cuarto artículo. Esta función se calculó por estimación directa de la forma de la curva de supervivencia mediante curvas no lineales en R-project⁵⁹ según los microdatos obtenidos del estudio de desplazamientos en los Países Bajos, o *Onderzoek Verplaatsingen in Nederland* (OVIN) en neerlandés (Statistics Netherlands, 2011), del año 2010 y realizada por la Oficina Central de Estadística de los Países Bajos, o *Centraal Bureau voor de Statistiek* (CBS) en neerlandés. En dicho estudio, los encuestados indicaban, entre otros, el Código Postal de 4 cifras (PC4) de origen, el PC4 de destino, el medio principal del desplazamiento, el motivo del desplazamiento y el tiempo de viaje además del factor de expansión correspondiente a cada encuestado.

Se calibraron 5 tipos de funciones, véase Tabla 1.6, con los datos de desplazamientos en coche, tanto como conductor como viajero, para motivos relacionados con el acceso o regreso del trabajo. Además, se limitó los viajes a aquellos que se realizaban entre zona origen y destino dentro de los Países Bajos, en menos de 90 minutos⁶⁰, y se agregaron los valores en grupos de 5 minutos en 5 minutos, debido a la tendencia de los encuestados a redondear los tiempos de viajes a múltiplos de 5.

Función	$f(c_{ij}, \theta)$	AIC	θ_1	θ_2
Potencial negativa	$c_{ij}^{-\theta_1}$	2,3377	0,3469	NA
Exponencial 1	$e^{\theta_1 c_{ij}}$	-34,7498	-0,0339	NA
Exponencial 2	$\theta_2 \cdot e^{\theta_1 c_{ij}}$	-41,7925	-0,0387	1,1632
Exponencial normal	$\theta_2 \cdot e^{\theta_1 \cdot c_{ij}^2}$	-73,2205	-0,0010	0,9853
(Log)logística modificada	$\frac{1}{1 + e^{\theta_1 \cdot c_{ij}^2}}$	-86,2425	-8,7897	2,7670

Tabla 1.6. Parámetros y valor AIC de las diferentes *funciones de disuasión según impedancia* estudiadas para los datos del OViN 2010.

La *función de disuasión según impedancia* obtenida que minimizó el criterio de información de Akaike, o *Akaike Information Criteria* (AIC) en inglés, fue la que corresponde a una función del tipo (log)logística modificada.

La tercera función definida, llamada IDF-c, es la que se usó en el quinto artículo y fue calculada mediante el procedimiento propuesto por Hyman (Luis & Berodia, 2006). En este caso se usó los valores agregados de la matriz de viajes entre municipios y distritos de Madrid, que

⁵⁹ Se usó la función de R-project nls, instalada en la librería general.

⁶⁰ El 98% de los viajes de la OViN 2010 para coche con motivos de acceso o regreso del trabajo se realizaron en menos de 90 minutos.

corresponden a los viajes iniciados entre las 8.00 y las 10.00, de la Encuesta Domiciliaria de Movilidad (EDM) del año 2004 realizada por el CRTM (Consorcio Regional de Transportes de Madrid, 2005).

Los tiempos de viaje interzonales de cada relación entre las zonas de transporte se calcularon como la media de los tiempos de viaje obtenidos de calcular los viajes de coste mínimo iniciados entre las 8.00 y las 10.00 cada 15 minutos y usando la red MultiNet® y los valores de HSP. Se calcularon dos tiempos internos, los cuales corresponden al tiempo medio en coche para acceder o regresar del centroide desde/hacia un 10% elegido aleatoriamente de las intersecciones en cada municipio y distrito cada 15 minutos en el periodo de los datos de flujos de viajes.

Las restricciones de cálculo de estas rutas son iguales a las empleadas en los otros casos de estudio y explicada en la sección 1.4.3. En este caso, se incluyeron los viajes internos, que representan el 40,33% de los viajes pese a ser solo el 5,98% de las relaciones no nulas de la matriz OD, siendo el tiempo medio de estos viajes de 4,14 minutos, con un valor mediano de 3,92 minutos y un valor máximo de 8,63 minutos. El resultado de aplicar el método de Hyman en este caso es que el valor R^2 entre los flujos de viajes de cada relación según la EDM y los obtenidos por el proceso de calibración es de 0,6534. La función resultante fue la expresada en la Ecuación 1.38:

$$f(c_{ij}) = e^{-0,12957849 \cdot c_{ij}} \quad \text{Ec. 1.38}$$

En la Figura 1.14, se pueden observar las 3 funciones dibujadas. Por un lado, la función IDF-b presenta una curva que penaliza poco los destinos que están en una cierta proximidad, decae rápidamente en tiempos de viajes intermedios (comportamiento exponencial), y alarga la cola para distancias mayores (comportamiento potencial negativa). Por el otro, las funciones IDF-a e IDF-c, al ser exponenciales, penalizan cualquier incremento de viaje de la misma manera, alcanzan valores de prácticamente no interacción con tiempos de viajes inferiores a 90 minutos, especialmente la última función, para la cual la posibilidad de interactuar con destinos a más de 20 minutos es inferior al 10%. Este comportamiento se debe al alto volumen de viajes internos y de poca duración que se han introducido en el modelo, en el caso de excluirlos, el parámetro de la función sería de 0,070, aproximando su forma a la de la primera función que ya omitía los viajes internos.

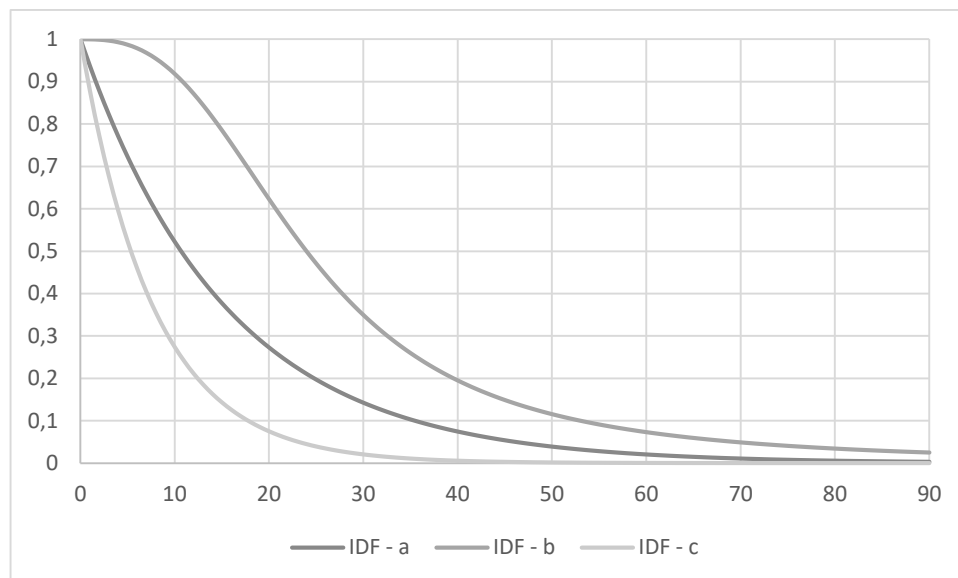


Figura 1.14. Las tres *funciones de disuasión según impedancia* usadas en esta tesis.

En el Anexo B se explica con más detalle los módulos usados para el tratamiento de estas bases de datos y obtención de las funciones presentadas en la figura anterior.

1.4.3. Especificaciones de cálculo

Conocido el tipo de indicador de accesibilidad que se usará en esta tesis, los objetos de estudios que se van a analizar en la tesis y las diferentes bases de datos disponibles para estos estudios, sus características, definiciones y limitaciones, se determinan las especificaciones de cálculo propias de cada objeto de estudio, así como definir los análisis a realizar, para convertir los datos en información.

Con respecto a la impedancia, ésta se define como los tiempos de viaje de cada relación posible, medidos en minutos, estimando oportunamente la valoración de los tiempos internos para cada caso de estudio. Para cada uno de los escenarios previstos en cada caso, se calculan un total de 96 valores de impedancias que darán lugar al mismo número de valores de accesibilidad, uno para cada 15 minutos que puede tener un día.

Estos valores definirán los perfiles de accesibilidad, y estarán referenciados a la hora de salida u hora de llegada según las necesidades propias de cada caso de estudio. Los cálculos de las impedancias para cualquier relación y escenario en todos los artículos se han calculado con herramientas de ArcGIS® Desktop y usando la versión dinámica de cada *Network*

Dataset, es decir, la impedancia es *TravelTime*⁶¹: las impedancias se obtienen mediante la definición explicada por el modelo tiempo de viaje experimentado (Ecuación 1.33) y con la incorporación del criterio FIFO por el cual se asegura que cualquier viaje que el orden de llegada a destino depende exclusivamente del orden de salida en origen, pudiendo llegar a la par en el caso más extremo. En todos los valores de impedancia fueron restringidos, además, las siguientes condiciones de cálculo:

- El centroide de cada zona origen y destino se reubicó sobre la red de transportes sobre el arco más cercano a una cierta distancia máxima con respecto a la localización original, la cual está definida en cada caso de estudio, y considerando que la reubicación no puede situarse sobre arcos restringidos o que sean de los tipos parte de un aparcamiento (FOW = 6), parte de un aparcamiento de diferentes niveles (subterráneo o en edificio) (FOW = 7), parte de una plaza para aparcamiento sin definición de plazas de aparcamiento (FOW = 8), entrada o salida de una zona de aparcamiento (FOW = 12), parte de una zona peatonal (FOW = 14), parte de una acera (FOW = 15), parte de una galería (tiendas) (FOW = 18), escaleras (FOW = 19), tramos en construcción (CONSTATUS = 'N') y tramos de circulación prohibida (ONEWAY = 'N'). En caso de que un centroide no pueda ser reubicado sobre la red, éste y la zona a la que representa serán excluido del estudio.
- Las rutas que definen el valor de la impedancia tienen en cuenta la presencia de sentidos prohibidos, por eso los valores de la relación de la zona *i*-ésima a la zona *j*-ésima no tienen por qué coincidir con el valor de la relación de la zona *j*-ésima a la zona *i*-ésima, y que se permiten hacer giros de 180° (*U-turns*) si es necesario en cualquier nodo de la red.
- Se pueden usar todos los arcos de la red, salvo aquellos que se indique lo contrario según la Tabla 1.7; algunos arcos se deben evitar en cierta medida, aunque pueden ser usados si la ruta lo requiriese:

⁶¹ Véase sección 1.4.2.1.2.

Restricción	Tipo prohibición
Avoid Ferries⁶² (Evitar ferries)	Avoid: Medium (Evitar en medio grado)
Avoid Pedestrian Zones (Evitar zonas peatonales)	Prohibited (Prohibido)
Avoid Private Roads (Evitar carreteras privadas)	Avoid: Medium (Evitar en medio grado)
Avoid Road for Authorities (Evitar carreteras para autoridades)	Prohibited (Prohibido)
Avoid Roads Under Construction (Evitar carreteras en construcción)	Prohibited (Prohibido)
Avoid Service Roads (Evitar vías de servicio)	Avoid: Medium (Evitar en medio grado)
Avoid Walkways (Evitar aceras)	Prohibited (Prohibido)
Oneway (Sentido de circulación)	Prohibited (Prohibido)
Restricted Turns (Giros prohibidos)	Prohibited (Prohibido)
Through Traffic Prohibited (A través de circulación prohibida)	Avoid: High (Evitar en alto grado)

Tabla 1.7. Condiciones usadas para el cálculo de las rutas y su grado de prohibición.

Todos los conjuntos de impedancias calculados han sido objeto de verificación de correcto calculo mediante la comparativa de sus valores con respecto a los que se obtienen en cualquier momento de cálculo con la red en flujo libre; todos los valores deben ser iguales o superiores a los que se obtienen en flujo libre. En caso de encontrar algún valor que no cumpla esta condición, se estudiaron las posibles causas de la anomalía de estos valores, se arreglaron los posibles causantes de la anomalía y se recalcularon las rutas.

La sección de análisis de resultados es la que mayor variedad de especificidades tiene debido

⁶² Los arcos de ferries han sido eliminados de la red, de manera que el uso de esta restricción es redundante.

a la naturaleza del objeto de estudio de cada artículo pese a que todos parten de la obtención de los 96 valores con referencia temporal que conforman los perfiles de accesibilidad de cada zona y escenario. Todo el análisis se realiza mediante la explotación de los resultados según el segundo axioma de Weibull para las medidas de accesibilidad. Todos los casos se caracterizaron por referenciar, en parte, los resultados obtenidos a algún valor de referencia que haya sido calculado en el mismo caso de estudio, pudiendo ser común o específico de cada área de estudio, obteniendo los perfiles de accesibilidad normalizados también. De esta manera, se proceden a calcular una serie de valores sobre cada perfil y su distribución espacial.

Finalmente, se debe destacar que los diferentes mapas obtenidos tanto en la definición de cada caso de estudio como de presentación de los resultados obtenidos tienen la misma escala por en cada figura, para evitar incorporar errores de interpetabilidad por escala, que los colores usados para representar cada valor son idénticos dentro de cada caso para poder realizar las comparaciones pertinentes de manera directa y que todos ellos están en escalas de colores siguen principalmente los modelos propuestos por Brewer y Harrower (2013) para poder ser diferencias por los observador daltónicos y, en la medida de lo posible, ser aptos también para impresiones en escala de grises.

1.4.3.1. Estudios de los efectos directos de la congestión en entornos metropolitanos

En los tres primeros artículos, los casos de estudio son los efectos de la congestión en la distribución de la accesibilidad en diferentes áreas metropolitanas europeas a lo largo de un día de entre semana tipo⁶³, las cuales fueron divididas en zonas cuadradas de 2km x 2km, tanto para el cálculo de los valores de accesibilidad como para su estudio. En consecuencia, solamente la componente *transporte* es la que varía de manera dinámica en los diferentes momentos de cálculo, manteniendo el valor de las oportunidades sin variaciones y sin ningún tipo de dependencia con respecto a la hora de llegada de cada relación (Ecuación 1.39).

$$a_i^{dt} = \sum_{j \in N} d_j \cdot f(c_{ij}^{dt}, \theta) \quad \text{Ec. 1.39}$$

Cada momento de cálculo se define por la hora de salida (dt). Se consideró que los tiempos

⁶³ Se tomó como día tipo los miércoles.

internos, tanto en zona origen como en zona destino, son nulos. Los centroides se reubicaron en la red de carretera a una distancia euclidiana máxima de 1.500 metros, puesto a que todas las zonas origen y destino son cuadrados de 2km x 2km.

En el primer artículo también se usó otro indicador para analizar los efectos de la congestión sobre el territorio. Éste fue la impedancia media ponderada de acceso a todas las oportunidades para cada zona de origen y hora de salida (Ecuación 1.40). Nótese que, pese a su formulación puede ser similar a la accesibilidad potencial (Geertman & Ritsema Van Eck, 1995), las unidades resultado son impedancias y que la parte funcional también incorpora los valores de las oportunidades.

$$\bar{c}_i^{dt} = \sum_{j \in N} d_j \cdot \frac{c_{ij}^{dt}}{\sum_{j \in N} d_j} \quad \text{Ec. 1.40}$$

En donde, \bar{c}_i^{dt} valor medio de las impedancias desde la zona i-ésima ponderadas por el peso de todas las zonas j-ésimas tomadas desde la hora de salida (dt).

Los resultados obtenidos pueden mostrar valores y distribuciones muy dispares debido al factor de escala asociado no solo a la propia dimensión espacial y de acumulación de oportunidades de cada área metropolitana en estudio, sino también como resultado de la distribución de los usos del suelo y el rendimiento de la red de transporte. Los resultados se normalizaron con respecto a valores en referencia, los cuales corresponden al valor obtenido de las respectivas zonas a la accesibilidad cuando la red se comporta en un estado de flujo libre para cualquier relación, representando el valor máximo de accesibilidad por carretera que se podía alcanzar y, por lo tanto, limita los valores relativos entre momentos de cálculo entre 0 y 1 (ambos valores incluidos). De esta normalización se obtienen los perfiles de accesibilidad normalizados, cuya operativa e interpretabilidad es idéntica a la descrita con los datos de TomTom®. Esta propiedad de los valores relativos también se usó como criterio de control de calidad de los resultados. Otro criterio de control de calidad específico de estos casos fue el garantizar de que se habían calculados todas las relaciones posibles $|N \times N|$.

Los estudios realizados en estos artículos analizan los resultados en valor absoluto y relativa en los siguientes niveles:

- Interno de cada área metropolitana: en él, la entidad territorial de estudio son cada una de las zonas que conforman las áreas metropolitanas (cuadrícula de 2km x 2km). Se

procede a estudiar la distribución de la accesibilidad en flujo libre [en valor absoluto] y como la evolución de la congestión en la red viaria distorsiona los valores de la accesibilidad [en valor relativo respecto escenario de referencia] de manera desigual, tanto espacialmente como en tiempo de afectación. De estos resultados, se ha analizado la distribución horaria de la máxima afectación por la congestión (menor valor), la distribución de la accesibilidad en los picos de congestión de la mañana y de la tarde, la diferencia entre picos, y el tiempo que cada zona está por debajo de su valor medio. Además, se realizaron animaciones sobre la evolución del valor relativo de accesibilidad para complementar los análisis.

- Comparativa entre áreas metropolitanas: en este nivel, por un lado, se estudia cada área metropolitana es tratada como un ente único con un único conjunto de valores adecuadamente ponderado. Entre los análisis realizados se estudia los perfiles obtenidos de las series temporales que se obtienen, tanto a nivel de valor absoluto como de valor relativo. Estos perfiles sirven para clasificar las zonas según cómo evoluciona la accesibilidad a lo largo del día. Por el otro lado, se realiza comparativas entre la forma y evolución de la accesibilidad a lo largo del día y de los valores de las zonas más destacables.

Los resultados se presentan en diferentes tablas y mapas estáticos agrupados en diferentes figuras según el interés de cada una de ellas, ya sea en mapas en dos dimensiones como en tres dimensiones (artículo 2). Además, en el caso de los artículos 1 y 2, se optó por presentar parte de estos resultados y realizar análisis de ellos mediante la agregación ordenada de los mapas estáticos presentados parcialmente previamente para la obtención de animaciones, con un lapso temporal entre ellos de entre 250 y 500 milisegundos entre mapas-fotogramas.

1.4.3.2. Estudio de los efectos de los cambios de las componentes en la accesibilidad y evolución de la congestión

El caso del estudio del cuarto artículo consiste en estimar como la congestión también modifica la distribución espaciotemporal de los efectos de posibles mejoras en la red viaria y cambios en la distribución de oportunidades en los Países Bajos entre 2009 y 2014, periodo de crisis económica.

Para este artículo, se volvió a usar la Ecuación 1.39 y se volvió a considerar que los tiempos internos eran nulos. Sin embargo, a diferencia de los artículos anteriores, en este caso se

definió las zonas de código postal de 4 dígitos (PC4) como unidad de cálculo. Debido a su forma irregular, la distancia euclidiana máxima de reubicación del centroide en la red fue de 5.000 metros, la de defecto en ArcGIS® Desktop. Por otro lado, se generaron los cuatro escenarios definidos a continuación, según a qué año hacían referencia cada una de las componentes, para poder comparar los efectos directos de cada uno de ellos forma similar a los trabajos presentados por Geurs y Ritsema van Eck (2003), y Levinson, Marion, Owen y Cui (2017):

- Escenario 2009, datos de 2009 tanto para componente usos del suelo como transporte y congestión.
- Escenario 2014, datos de 2014 tanto para componente usos del suelo como transporte y congestión.
- Escenario parcial de efectos de los cambios de los usos del suelo, datos de 2014 para la componente usos del suelo y de 2009 para la componente transporte y congestión
- Escenario parcial de efectos de los cambios en transporte, datos de 2009 para la componente usos del suelo y de 2014 para la componente transporte y congestión

Se garantizó que los resultados calculados para cualquier escenario estaban libres de valores altamente sospechosos de ser erróneos al asegurar que los valores en cualquier escenario para cualquier parte del día y día deben ser siempre igual o menores a los que se obtienen para ese mismo escenario y día en flujo libre. Pese a que, en este caso, no se pudo establecer criterio de calidad con respecto al número de relaciones puesto a que se limitaron a solo aquellas que se podían realizar en menos de 90 minutos, si se garantizó que en flujo libre el número de destinos accesibles desde cada zona origen representaba el valor máximo.

Para cada escenario, se agregaron los resultados en tres conjuntos de valores de accesibilidad para cada día de entre semana y para cada municipio. Estos tres valores hacen referencia al valor medio de la accesibilidad en las horas de la hora punta de la mañana, las horas del mediodía y las de la hora punta de la tarde. Cada conjunto está formado por los siete valores que representan la accesibilidad de en siete salidas consecutivas cada 15 minutos.

El uso de municipios como entidades territoriales de análisis se debe a que las PC4s tienen tamaños muy dispares, siendo muy pequeñas en las zonas urbanas e inmensas en zonas rurales, en dónde un municipio equivale a un PC4. Este hecho imposibilita el poder observar

resultados en las escalas requeridas en este estudio, siendo necesario un nivel de agregación a una escala territorial mayor sin perder las tendencias espaciales generales. Nótese esta agregación ha supuesto reducir 10 veces, aproximadamente, el número de entidades a estudiar y cartografiar; de 4.010 PC4s a 426 municipios.

En este caso, se estableció que los conjuntos de valores del escenario 2009 son los valores de referencia, y sobre los cuales se normalizarían los valores del resto de escenarios. Todo el análisis se basa en la comparativa con el escenario 2009, salvo el propio análisis del escenario de referencia, que estudió la distribución de accesibilidad en valor absoluto para este escenario. Los valores normalizados se encuentran en el subconjunto de los números reales positivos, significando que se pierde accesibilidad con respecto al escenario de referencia para cualquier valor inferior a uno, y que se gana accesibilidad en caso contrario.

Los resultados también se analizan a nivel de determinar qué cambios de las dos componentes estudiadas (usos del suelo y transporte) tiene mayor influencia sobre el resultado final mediante el análisis de la posición de cada resultado en un diagrama de puntos cuyo eje de abscisas corresponde a la diferencia de los valores relativos del escenario 2014 respecto al 2009 menos los valores relativos del escenario parcial de efectos de los cambios de los usos del suelo respecto al 2009, y cuyo eje de ordenadas se define igual, pero usando el escenario parcial de efectos de los cambios en transporte; un valor sobre el eje de abscisas, representa que todo el cambio en el escenario 2014 se debe al cambio en la componente transporte.

Todos los resultados son presentados en figuras que agregan 15 mapas, uno para cada día y parte del día estudiados, o mediante diagramas que representan el trazado de algunas autopistas neerlandesa cuyo origen se encuentra en el municipio de Ámsterdam.

Nótese que en este estudio se considera que los cambios en la distribución de los valores del flujo de tráfico a lo largo del día y del territorio, es decir la congestión, depende exclusivamente de los cambios en la red de transportes. Pese a que esta hipótesis es poco probable en los escenarios parciales, ésta es necesaria para mantener la independencia de las componentes y obtener valores indicativos útiles sobre los efectos directos de los cambios en cada componente.

1.4.3.3. Estudio de los efectos de los cambios de las componentes en la accesibilidad y la congestión

El último artículo, el caso de estudio es el de determinar la interacción de cambios dinámicos tanto en la red de transportes como en la localización de las actividades a lo largo de los días de entre semana en la accesibilidad. En consecuencia, la componente *usos del suelo* y la componente *transporte* pueden variar de manera dinámica a lo largo de los diferentes momentos de cálculo; para incluir esta hipótesis de cálculo, se usó la Ecuación 1.41.

$$a_i^{at} = \sum_{j \in N} d_j^{atr} \cdot f(c_{ij}^{at}, \theta) \quad \text{Ec. 1.41}$$

En este caso, se considera el valor de la accesibilidad de cada zona i -ésima al llegar a los respectivos destinos en las zonas j -ésimas a una hora determinada (at). Es decir, el valor de la impedancia depende de la hora de llegada, no de la hora de salida como en los casos anteriores. Al igual que en el caso anterior, se permitió reubicar el centroide sobre la red de transportes a una distancia euclidiana máxima de 5.000m con respecto a la posición inicial, puesto a que se usó como entidad territorial y de análisis las zonas de transporte de la Comunidad de Madrid.

Para este caso de estudio, se calcularon los tiempos de viajes internos como valores estáticos medios a partir de las rutas que minimizan la distancia a pie desde un 10% de las intersecciones de cada zona, seleccionados aleatoriamente, a su centroide a una velocidad de 5km/h. En este caso se han excluido los arcos de autopistas y autovías (FRC 0-1), y permitiendo el uso de vías de peatones, aceros o cualquiera de los dos sentidos de cada arco. Si el tiempo resultante es mayor a 10 minutos, el tiempo interno se establece en 10 minutos para el caso de zonas en el interior de la llamada Almendra Central de Madrid, es decir, el polígono delimitado por la vía de circunvalación M-30, y fuera de la Almendra Central, el tiempo interno es el obtenido de recorrer el radio equivalente del área de la zona⁶⁴ (Rich, 1975) a una velocidad de 30km/h.

En total, se generaron cuatro escenarios dependiendo de la naturaleza estática o dinámica de los valores de cada una de las componentes:

⁶⁴ Radio equivalente = $\sqrt{\frac{\text{Area}}{\pi}}$

- Escenario estático, los valores de cada componente es único. Estos valores representan el valor medio de cada componente con respecto a sus valores dinámicos. Este escenario se considera escenario de referencia para el estudio del resto de escenarios, puesto a que ha sido el que tradicionalmente se ha usado. No se tiene en cuenta la congestión.
- Escenario dinámico, los valores de cada componente dependen de la hora de llegada a destino. Se tiene en cuenta la congestión.
- Escenario sólo usos del suelo dinámicos, sólo los valores de las oportunidades en zonas destino dependen de la hora de llegada. No se tiene en cuenta la congestión.
- Escenario sólo transporte dinámico, sólo los valores de las impedancias entre las zonas i -ésimas y la zona j -ésimas dependen de la hora de llegada a las respectivas zonas destino j -ésimas. Se tienen en cuenta la congestión.

En este caso, las tareas de control de calidad específicas para todos los escenarios sólo se pudieron realizar en referencia a garantizar el cálculo de todas las relaciones $|N \times N|$. Las tareas de control de calidad de los resultados de la accesibilidad realizadas en los dos casos anteriores, sólo se pudieron realizar para los escenarios estático y de sólo transporte dinámico, por definición de sus resultados. En el resto de casos, debido a que cada momento de cálculo puede contener alguno máximo o mínimo de zona, no existe ningún momento de cálculo cuyos valores pueda servir como valores de referencia, por definición inequívoca de momento de valores máximos o mínimos.

El análisis de los resultados se realiza principalmente a nivel desagregado territorialmente (zonas de transporte de Madrid) con el fin de conocer la distribución espacial de cuando la accesibilidad estática o tradicional sobrestima (valores inferiores a 1) o subestima (valores superiores a 1) los valores de la accesibilidad con alguna componente dinámica; el rango de valores posibles pertenece al subconjunto de valores reales positivos. También se obtienen indicadores agregados para diferentes partes del día y se analiza la distribución espacial del coeficiente de variación de los valores de accesibilidad para escenario con alguna componente dinámica. A nivel agregado, se realiza una comparativa del comportamiento de cada escenario a lo largo del día.

Los resultados, al igual que en los artículos 1 y 3, se presentan mediante una serie de tablas y mapas estáticos agregados en figuras, y mediante realización de una serie de animaciones que permiten observar la sucesión de cambios analizados a nivel espaciotemporal.

BLOQUE 2 | **SECTION 2**

Papers

2. Papers

Paper 1: Working with the daily variation in infrastructure performance on territorial accessibility. The cases of Madrid and Barcelona. *European Transport Research Review*, 7(2), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0168-2> (Moya-Gómez & García-Palomares, 2015)

Paper 2: The daily dynamic potential accessibility by car in London on Wednesdays. *Journal of Maps*, 13(1), 31–39. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1305301> (Moya-Gómez & García-Palomares, 2017a)

Paper 3: The impacts of congestion on automobile accessibility. What happens in large European cities? *Journal of Transport Geography*, 62, 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.05.014> (Moya-Gómez & García-Palomares, 2017b)

Paper 4: The spatial–temporal dynamics in job accessibility by car in the Netherlands during the crisis: Impacts of infrastructure investments, congestion, and the spatial developments for 2009-2014. *Regional Studies* (under revision) (Moya-Gómez & Geurs, n.d.)⁶⁵

Paper 5: Dynamic Accessibility using Big Data: The Role of the Changing Conditions of Network Congestion and Destination Attractiveness. *Networks and Spatial Economics*. <https://doi.org/10.1007/s11067-017-9348-z> (Moya-Gómez et al., 2017)

Notice: For accepted or published articles, their write-up in this block matches the latest document sent to journals, and that was considered accepted without modifications for publication. If there is any possible discrepancy between this block's text and the text published in journals, this should be noted as a minor modification that occurred during the magazine layout process. However, the position of the figures and tables, quotation formats and the sequence of footnotes in this document may differ from publications in journals due to document layout issues.

For quoting any of following papers, please use the journal reference.

The first and last page of each published article in in annex F.

⁶⁵ First version of this paper. Provisional title

Paper 1: Working with the daily variation in infrastructure performance on territorial accessibility. The cases of Madrid and Barcelona

Moya-Gómez, B. and García-Palomares, J.C. (2015). European Transport Research Review, 7(2), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0168-2>

Abstract

Purpose: Accessibility measurements are good tools for analysing the performance of possible policies on land use / transport / society systems. Until now, accessibility has been approached from a static perspective, even when variations in it depend on short term temporal changes in network function. Solutions based on static measurements, with journey costs taken as units based on free-flow travel time; do not reflect real network performance at different times of the day.

Methods: In order to broaden our understanding of accessibility and study real-world dynamism in depth, information from new sources has been incorporated into traditional accessibility measurements, with actual observed data on the daily variations in speed profiles. These variations have been used to assess the impact of congestion on accessibility, with dynamic scenarios calculated every 15 minutes.

Results: The variations in daily accessibility in the metropolitan areas of Madrid and Barcelona (Spain) have been mapped with reasonable computational costs. Although both cities have a similar global behaviour pattern, each has a different daily spatial accessibility distribution. Madrid appears to be more resilient than Barcelona.

Conclusions: With new technologies it is possible to overcome previous technical barriers, such as the lack of reliable information or calculating capacity. An ordinary computer has been used to obtain complete and detailed temporal profiles of the two traditional accessibility measurements. Thanks to these new measurements, we have a better understanding of accessibility. However, in order to express a dynamic phenomenon in static format, appropriate mapping schemes would have to be devised.

Keywords: daily accessibility, dynamic impedance, GNSS, GIS.

1. Introduction

In recent decades, the concept of accessibility has gradually gained importance. It has proved to be a useful tool for understanding the functioning of land use / transport / society systems and also for measuring the scope of human activity relations at territorial level. Accessibility is one element to consider in decision-making involving any action or policy that may influence the performance of this system. This is how it has been understood by numerous governments, who have incorporated accessibility in their territorial planning policies. Among the examples most frequently quoted are those of the Netherlands, with their ABC philosophy (Martens & van Griethuysen, 1999), the United Kingdom, which introduced accessibility as a strategic objective in its national policy in 1994 (Department of Environment & Department of Transport, 1994), and the European Union, which includes accessibility as an objective in its spatial development perspective (European Commission, 1999).

Although accessibility is a widely used concept in various fields of science, it is usually misunderstood (Geurs & Van Wee, 2004) and may even be confused with mobility (Hodge, 1997). In reality, mobility is one of the results of accessibility. The source of this confusion lies in the fact that there is no single unanimous definition of the concept of accessibility. On the contrary, numerous definitions can be found in literature. One of the most frequent is *the ease with which activities can be reached, given a location, using a specific transport system* (Morris et al., 1979), or *the ease of interaction with a significant number of opportunities* (Breheny, 1978; Bruinsma & Rietveld, 1998; Hansen, 1959). Most definitions emphasise the role of accessibility as a territorial potentiality, implying that its values are a consequence of the complex system based on human activities. In any case, accessibility can be said to be much more than just the main product of the transport system as Schümann and Talaat have proposed (Schümann & Talaat, 2000).

Any change in one of the components of the land use / transport / society system would therefore have an impact on accessibility and at the same time generate reactions in the rest of the components and their relationships. By analysing how accessibility changes at different times or scenarios, it is possible to measure these impacts and know the effects of changes on transport networks, such as the construction of new transport infrastructures, new transport policies and regulations, the evolution of actual traffic flows and the standard of service throughout the network. At the same time, accessibility is also influenced by changes in the location of economic activities (such as changes brought about by new activities or the

relocation of existing ones, or changes in the attractiveness of the destination), as well as the impacts of societal changes in habits, capacities or willingness to travel. The usual procedure for measuring the impact of these changes on accessibility is to compare values and their spatial distribution before and after the change being studied. For example, to assess the impact of the construction of a motorway, a comparison of the scenario with and without the motorway is made, while the rest of the components, which are not being studied, are kept constant. This makes it possible to isolate the effect of change on the transport network (Gutiérrez, Condeço-Melhorado, López, & Monzón, 2011).

This same scenario-based methodology has previously been used to study the effects of congestion on accessibility. In this case, two standard traffic scenarios were compared, one at off-peak times and the other with rush-hour traffic (Vandenbulcke et al., 2009). However, comparison of these two scenarios may not be appropriate because neither of them captures the temporal change in infrastructure performance. To do these studies properly it is necessary to use a dynamic approach that incorporates the temporal sequence of network speeds with increases and reductions in traffic volume. Unfortunately, one of the main problems of using dynamic accessibility measurements is the difficulty in obtaining the required information on speeds. The lack of data and the fact that either estimated or unreliable speeds are used may distort the results and could lead to wrong conclusions.

Fortunately, it is possible with today's new technologies to obtain information that was previously unattainable, as well as work with ever larger databases. For instance, thanks to devices with GPS location technology, reliable information can be obtained on speed variations observed in infrastructure performance (Quiroga, 2000). The use of these new sources of information and the greater processing capacity of computers has enabled detailed studies of dynamic accessibility in large metropolitan areas to be carried out. As a result, the causes of most of the secondary effects of accessibility on different planning actions or policies are beginning to be understood, such as possible temporal effects based on Braess's paradox ((Braess et al., 2005) translated from (Braess, 1968)), which cannot be properly estimated with traditional static accessibility measurements.

This article studies how to introduce information on the variation in transport infrastructure performances through changes in speed in the road network during the course of the day. Big data information incorporated in a GIS environment has been used (in this case TomTom® Historical Speed Profiles) with the aim of calculating the variation in accessibility every 15

minutes on a typical mid-week day. The proposed methodology has been tested on Spain's two most populous metropolitan areas, Madrid and Barcelona. Results based on their respective accessibility profiles show differences between the two cities in both global variation and territorial and temporal distribution.

The article is laid out as follows: After the introduction, Section 2 is a brief review of accessibility measurements and how to adapt them to make the leap to studying temporal variations in infrastructure performances. Section 3 presents the areas of study, the data used and computational specifications. The results are shown in Section 4. The final section is a discussion of the conclusions and possible steps to be taken in future research, with the aim of making use of all the new information.

2. From static to dynamic accessibility. Some approaches

Authors of previous studies have proposed different methods to measure accessibility. As with the definitions of accessibility, each proposal depends on which element of the land use / transport / society system is being emphasised, as well as on the information available (Gutiérrez, 2001) and/or on computational capacity. There are therefore numerous proposals for classifying the different methodologies used. Geurs and Ritsema van Eck (Geurs & Ritsema van Eck, 2001), for example, classify accessibility measurements into three major categories: those based on infrastructures (levels of service), those based on activities (the number of jobs less than 30 minutes away, or the number of activities a person can carry out in a maximum period of time), and those based on utility (accessibility considering individual preferences according to discrete choice theory). Other classifications of interest can be found in Morris, Dumble and Wigan (Morris et al., 1979); Reggiani (Reggiani, 1999); Bruisman and Rietveld (Bruisman & Rietveld, 1998); Handy and Niemeier (Handy & Niemeier, 1997); Geurs and van Wee (Geurs & Van Wee, 2004); Curl, Nelson and Anable (Curl et al., 2011); and Paez, Scott and Morency (Páez et al., 2012).

2.1. Two approaches to measuring accessibility

The challenge presented by different methodologies for measuring accessibility, as with any other measurement, is to fulfil two basic requirements: the degree of confidence and consistency of the measurement with observed behaviour (*soundness*), and the transparency and simplicity of calculation procedures and their capacity for communicating results (*plainness*) (Bertolini et al., 2005). While maintaining these two requisites, two classic static

accessibility measurements are modified in this article in order to capture the dynamism of changes in daily network functioning. The measurements used are *average weighted impedance* and *potential accessibility*. Their definitions each incorporate both transport system performances and the spatial distribution of opportunities.

The *average weighted impedance* (Gutiérrez & Urbano, 1996) calculates accessibility for each zone of origin as the average impedance (e.g. time or cost) of reaching all destinations within the study area. The importance of the opportunities at destination (e.g. population, employment or GDP) weights for each Origin-Destination impedance. The obtained results are very simple to understand, even for non-experts: any location with low average impedance is near destinations and their opportunities. For each origin, this average weighted impedance is calculated as follows:

$$\dot{c}_i = \frac{\sum_{j \in N} D_j \cdot c_{ij}}{\sum_{j \in N} D_j}; \forall i \in N \quad (A)$$

Where: \dot{c}_i is the average weighted impedance of zone i ; c_{ij} is the impedance of travelling from zone i to zone j ; D_j is the weight or potential of zone j ; and N represents all zones included in the study area.

However, it should be pointed out that this accessibility measurement has certain determinants and that it is necessary to be aware of these, otherwise its soundness and plainness may be obscured. Firstly, this indicator requires a complete impedance matrix: that is, all origins must reach all destinations. Working with unviable relationships introduces anomalous values that may lead to erroneous interpretations. Secondly, results of this measurement are closely linked to the definition of the study area, especially in peripheral zones. For example, there may be a great distance between origins and concentrations of opportunities, with hardly any relationship between them. Nevertheless, the presence of these distant opportunities would affect the accessibility value. This shortcoming could partially be fixed by imposing a predefined impedance threshold. Finally, because results are expressed in units of travel costs, the *average weighted impedance* may easily be misinterpreted as exclusively measuring transport system performance, while other components, e.g. the spatial distribution of opportunities and its amount, are ignored.

The second used measurement, the *potential accessibility*, is based on the definition given by Hansen (Hansen, 1959). This measurement can be interpreted as the sum of the *equivalent*

perceived opportunities reachable from an origin, since the weight of any destination decreases as impedance increases. As a result of this definition, a large concentration of opportunities in a distant location may be perceived as being as attractive as another location nearer the point of origin but with fewer opportunities. Traditionally, the result has been measured in units called *Market Potential Units (MPUs)*. It should be noted that one of the strengths of this measurement is that any unreachable zone per origin does not introduce any anomalous values; their opportunities are not taken into account. The general equation for calculating potential accessibility is as follows:

$$PA_i = \sum_{j \in N} D_j \cdot f(c_{ij}); \forall i \in N \quad (B)$$

in which PA_i is the potential accessibility value of zone i ; D_j is the potential of zone j ; $f(c_{ij})$ is the impedance-decay function; c_{ij} is the impedance of travelling from zone i to zone j , and N represents all the zones included in the study area.

The *potential accessibility* is also influenced by the area chosen for the study. There are some opportunities outside that region that may strongly influence the accessibility values, especially in the border region. In order to fix this problem, we should expand our area of calculation beyond borders, including also all opportunities inside the surrounding buffer area of our study area and calculate the impedances between each origin in our study region and these opportunities as destination. On the other hand, when it comes to comparing different spaces (such countries, regions or cities), this method may lead to erroneous conclusions since results depend to a great extent on the total number of opportunities within the study area.

2.2. Moving through the transport network. Static impedances and dynamic impedances.

Irrespective of the type of measurement, estimation of the transport component is essential for studying accessibility. The transport network shapes real distances or impedances within the study areas. Thanks to transport networks, distant locations can be reached more rapidly or more cheaply than others that may be nearer but which are badly connected. Traditionally, impedance has been measured as a single constant value for any origin-destination relationship and calculation scenario (which usually corresponds to the lowest cost route). The value of the static type of impedance is defined by the following equation:

$$c_{ij} = \sum_{e \in E} \alpha_{eij} \cdot c_e ; \forall ij \in G \quad (C)$$

where c_{ij} is the impedance of travelling between zone i and zone j , the value of which is invariable in time; α_{eij} is the binary variable that indicates whether arc e is used in the journey between zone i and zone j ; c_e is the impedance of arc e , which is predetermined and constant; G is the set of origin-destination relationships; and E is the set of arcs in the study area network.

By definition, static impedances omit the possible variation in infrastructure performance experienced by any vehicle travelling in a particular calculation scenario. This type of measurement is, therefore, only appropriate for studies in which these internal-scenario variations are irrelevant, such as the comparison of scenarios for two different years in the same country. On the other hand, the study of dynamic phenomena, such as changes in accessibility in an urban space during the course of the day, cannot be carried out satisfactorily with static methods (Ben-Akiva, 1985). In these studies, impedances not only depend on which scenario is calculated or on journey departure time, but also on when each arc is used. Figure 1 shows an example of the difference between the shortest route estimated by static methods and dynamic methods for a vehicle that begins its journey at 09.00 hours. The weights of each arc are expressed in minutes and it is assumed that information on the state of the network is given every 5 minutes. The static method estimates the cost between origin and destination to be 11 minutes, although the vehicle will really take 10 minutes because when it arrives at the third arc, its cost will have decreased. In contrast, the route estimated by dynamic methods has an impedance of 9 minutes.

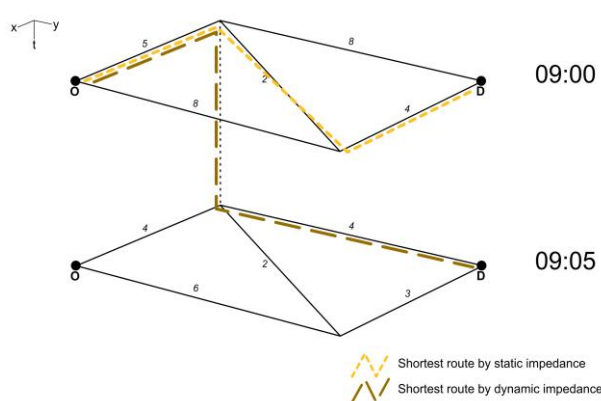


Figure 1. Example of the differences between the shortest route estimated by static methods and by dynamic methods.

Impedances estimated by static methods may be considered as simplifications of those obtained by dynamic methods (instantaneous travel time vs. experienced travel time (Chiu et al., 2011)). Calculation of dynamic impedances is shown in equation D:

$$c_{ij}^t = \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} \alpha_{eij}^{tm} \cdot c_e^m; \forall ij \in G, t \in T \quad (D)$$

Where: c_{ij}^t is the impedance experienced when travelling from zone i to zone j , beginning at instant t ; α_{eij}^{tm} is the binary variable that indicates whether arc e , use of which begins at instant m , is used for the journey between zone i and zone j which has begun at instant t ; c_e^m is the expected impedance of arc e , use of which begins at instant m ; T is the set of instants of started journeys; G is the set of origin-destination relationships; E is set of arcs in the study area network; and M is the all possible instants within the scenario.

There are some complications to be taken into account when working with dynamic impedances. In the first place, as it has already been mentioned, there is the difficulty of obtaining the information required for each arc and at each instant. However, nowadays this information can be obtained from simulations (Y.-H. Wu, Miller, & Hung, 2001) or from information provided by users willing to share tracks from their navigational devices. In this case, the information may be sold by major navigational companies. These huge databases are usually expensive or not accessible for all the network of our study area. On the other hand, unlike static routes, dynamic routes may require that at some point in the journey it is more appropriate to wait or use a sequence of arcs with fewer performances in order to avoid high costs in “downstream” arcs, which should be used if another more attractive sequence of arcs in a previous instant is selected. This runs contrary to the observations made by Dijkstra for defining his search algorithm of the lowest cost paths in static situations (Dijkstra, 1959). Fortunately, there are very specific dynamic routes that can be studied by trivial changes in Dijkstra algorithm (Chabini, 1998; Dean, 2004). These algorithms find routes by solving as many static scenarios as temporal performance description have the study network (Figure 1). The dynamic routes which starting time is known, without overtaking and its unique target is arriving as soon as possible -as used on this paper-, can be calculated by these modified Dijkstra’s algorithms.

3. Estimation of dynamic territorial accessibility. Testing in Madrid and Barcelona

As already indicated, computational capacity could have been proved to be a great barrier by many studies. The problem here comes from the underlying complexity of finding the shortest route for every Origin-Destination pair in a dynamic way in a network containing a great quantity of detail. These problems are interrelated, since a greater quantity of information and detail involves greater computational cost. The correct choice of the data to be treated, and of the software and processes to use, is therefore no trivial matter. We chose Madrid and Barcelona to prove the feasibility of a study on the daily variation of accessibility in two large metropolitan areas. In this section, aspects are outlined related to the network used and its previous processing (for example, simplification), the definition of the scope of the study (so that the settings are comparable) and the specifications of the accessibility analysis. In order to avoid possible biases in the results and the comparison between cities, we used the available data for each study area from the very same source and very same methodology per each feature.

3.1. The road network.

This study has used the March 2013 version of TomTom® for the Spanish road network, together with information on *Historical Speed Profiles* for the years 2011 and 2012 obtained from the average journey times reported from users' navigation devices. As the original network is very detailed (it includes accesses to car parks, pedestrianised streets, residential streets and country roads), arcs where not much traffic is expected have been omitted. The arcs used in the study are defined by TomTom® as ranging from 0 to 6 in the Functional Road Classification (FRC) ⁶⁶. The network used has full connectivity, with a total of 3,969,483 one-way arcs representing 300,122.2528 km, of which 46.48% also have historic speed profiles. The entire Spanish network has been used so that the estimated route is always the shortest, even if this requires the use of arcs outside the study area.

The Historic Speed Profiles are defined as a percentage every 5 minutes with respect to the observed free-flow speed of the arc. As a result, an arc of a motorway and an arc of a city

⁶⁶ TomTom®'s FRC Definitions. FRC 0: Motorway, Freeway, or Other Major Road; FRC 1: a Major Road Less Important than a Motorway; FRC 2: Other Major Road; FRC 3: Secondary Road; FRC 4: Local Connecting Road; FRC 5: Local Road of High Importance; FRC 6: Local Road; FRC 7: Local Road of Minor Importance; FRC 8: Other Roads.

street may both have the same speed profile but have different speeds at the same instant because of their different free-flow speeds. This data structure saves on computational memory and cost and is prepared so that it can be used with the GIS software (ESRI® ArcGIS).

3.2. Areas of study: Madrid and Barcelona

The definition of the limits of metropolitan areas is usually not unique and it might even be confusing. In this article, the metropolitan area is taken to be all the towns (LAU2 (Eurostat, 2011) in Eurostat terminology) that have more than 50% of their municipal territory within a density isoline of 500 inhabitants/km² from the main city. This isoline was generated with the density kernel tool⁶⁷, using the 1 km² EEA reference grid (European Environment Agency, 2007) with Eurostat population data from 2006 (Eurostat, 2012). It was limited to those municipalities that formed part of the Functional Urban Area (FUA, (ESPON, 2014a)) of the main city or a town completely surrounded by it. With this delimitation, we obtained study areas with demarcation criteria for opportunities and similar relationships, adapted to the study of congestion.

As a result, the Madrid study area has 5,502,282 inhabitants (representing the sum total of potential values of the areas) / 2,312 km² / 39 municipalities and the metropolitan area of Barcelona has 4,277,836 inhabitants / 1,420 km² / 88 municipalities.

The use of municipalities as origins and destinations may be inappropriate for performing a good spatial analysis, as there are few resulting relationships. Moreover, the use of the EEA reference grid to estimate accessibility involves excessive computational load, which makes the present study unfeasible, despite the use of a standard grid overcomes the modifiable areal unit problem (MAUP). It was therefore decided to use an intermediate grouping, with 2 x 2 km cells obtained from the 1 x 1 km EEA grid. This resulted in Madrid having 490 zones of origin and destination and Barcelona 344. This number was derived from the grouping shown and the exclusion of cells that have no network arc in their area (which would leave them disconnected). In any case, the origins and destinations considered represent 99.9% of the population in each metropolitan area.

Finally, in order to reduce some of the problems derived from the effects of demarcation on

⁶⁷ Density kernel is a tool of ArcToolBox of ArcGIS; the search radius used to estimate the values was 5.000 and 10.000 metres

the study areas (border effects), the total size of the area of calculation was extended to all cells outside the previous demarcation that could be reached from an origin in the study area in less than 15 minutes (with free-flow speeds). The use of these cells avoids the effects of the demarcation border on origins within the study area and makes it possible to produce raster maps without large distortions at the edges. Figure 2⁶⁸ defines the study areas and extended areas and shows the transport network used and the population distribution in 2006.

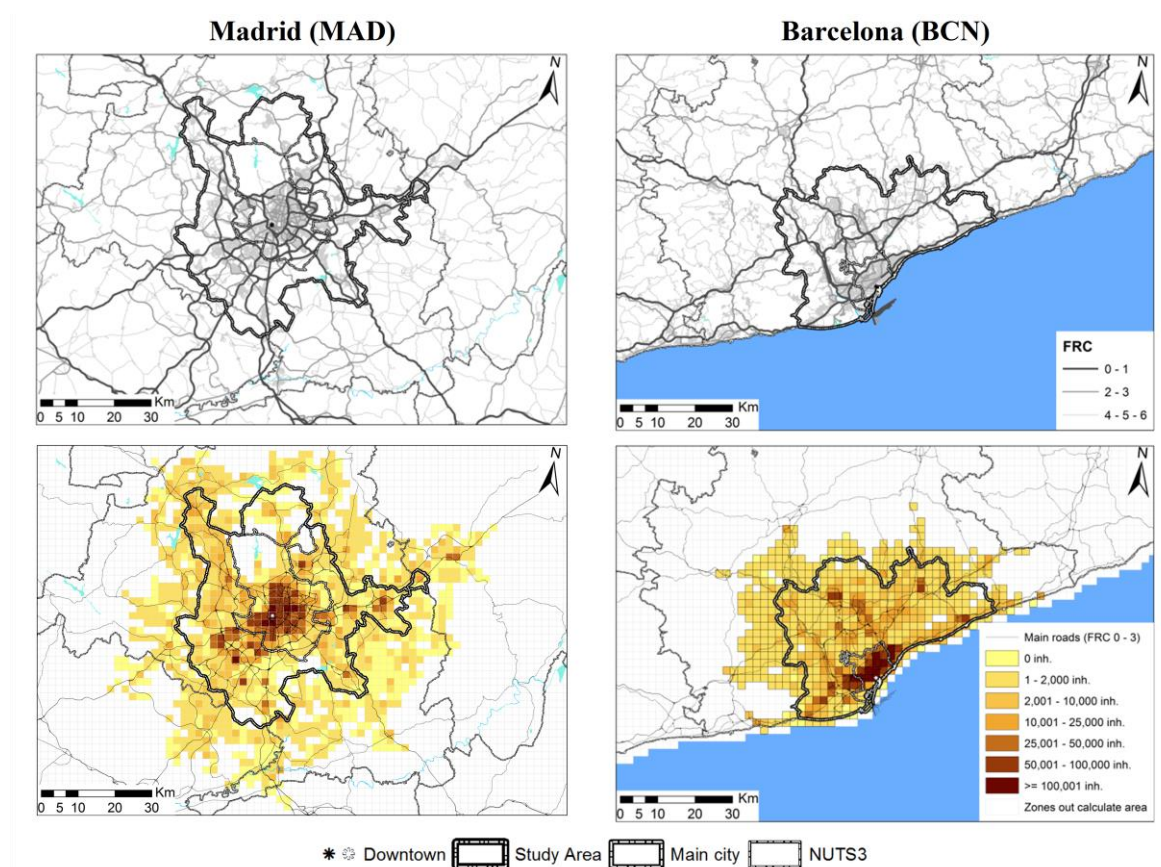


Figure 2. Transport network, study areas, areas of calculation (with cell and population) and population distribution in 2006.

It is worth noting that, although both cities tend to concentrate most of their population in the main city and peripheral towns. In Madrid, relatively few inhabitants do not have easy access to the main road axes. Barcelona has a larger quantity of populated cells that are some distance away from such axes, chiefly in areas of residential development. It is also worth pointing out that net average population densities in both study areas are similar: 3,582

⁶⁸ The projection of all maps of this document is LAEA (EPSG:3035) and the scale is 1:500000 on DIN A-4. All of them are also available in more resolution on pdf files in electronic supplementary material.

inhabitants/km² in Madrid and 3,145 inhabitants/km² in Barcelona. However, as a consequence of the differences in urban distribution, Barcelona has a greater population density than Madrid up to a 25 km radius from the city centre. All the zones analysed in each study area are less than 40km from the centre of Barcelona (Plaça de Catalunya) and 45km from the centre of Madrid (Puerta del Sol).

3.3. Work specifications and computational performances

As the object of this study was to analyse the effect of variations in infrastructure performances, the weight of each destination was considered as an invariable value (2006 population). Consequently, it was the transport component that was obtained with a dynamic approach. In total, 96 scenarios were calculated on a typical mid-week day (Wednesday), which involved gathering information every 15 minutes on journey times from each zone to the rest. To calculate *potential accessibility*, an exponential distance-decay function was used, with a parameter of -0,065. Calibration was carried out using a modified version of the Furness algorithm (Furness, 1965; Ortúzar & Willumsen, 2011), with data from journeys for work between municipalities obtained from the 2001 Population and Housing Census in Spain (INE, 2004)⁶⁹. The use of an exponential decline function avoids anomalous self-potential values (Frost & Spence, 1995), since it transforms all opportunities into MPUs.

Global accessibility values were obtained by adding the value of each origin zone by its weight, as expressed in the following equation:

$$A_{global}^t = \frac{\sum_{i \in N} A_i^t \cdot O_i}{\sum_{i \in N} O_i}, \forall t \in T \quad (E)$$

Where: A_{global}^t is the global accessibility weighted value of the study area, when journeys start at instant t ; A_i^t is the accessibility value (both by *average weighted impedance* and *potential accessibility* methods) of zone i when journeys start at instant t ; O_i is the weight or potential of zone i ; N is all the study zones, and T is all the instants of journeys started.

⁶⁹ To date of publish this paper, there are also available data of 2011 Population and Housing Census in Spain (but it was a survey). Unfortunately this data is presented very aggregated, in order to obey the statistical secret imposed by Spanish law 12/1982. As a consequence, commuter data is only available in municipalities' level, and only for municipalities with more than 80,000 inhabitants, Microdata are available too, but the results are also very aggregate.

The procedure was carried out on a single computer⁷⁰, using mainly ESRI® ArcGIS10.1 GIS software. In this particular environment, the free tool for ArcGIS StreetDataProcessingTools⁷¹ was used to create the Network Dataset, while Network Analyst tools were used to obtain different O-D impedance matrices for each of the areas and study intervals. These were calculated taking into account prohibited turns and arc directions through the analysis of hierarchical routing (ESRI, 2014a). Hierarchical analysis considerably improves calculation times without offering solutions that are very different to those obtained from other heuristic processes installed in this environment. For the cartographic presentation of results, raster surface maps were created with IDW interpolation (specifications: power parameter = 2, with 12 points of reference).

With reference to calculation times, the most time-consuming process was the creation of the O-D impedance matrices. Each matrix took almost 19.5 minutes to create in the case of Madrid (Table 1), which meant 31 hours to obtain the complete time series for one day (one matrix every 15 minutes, 96 scenarios). In contrast, a matrix for Barcelona was generated in 5.7 minutes, which meant a total of 9 hours for the 96 scenarios. The total time for the remaining processes did not exceed 30% of the time taken to build the matrices. It is important to note that at no time were there any problems with memory.

Study area	Total extended area points	Total routes	Average total routes calculation time per scenario
<i>Madrid</i>	1,236	1,527,696	19.40 min
<i>Barcelona</i>	604	364,816	5.67 min

Table 1: Summary of calculation time for the study areas.

4. Results

The results are shown in two sections. The first shows results from a global perspective and the second analyses the spatial distribution of changes in accessibility derived from the daily variation in network speeds. In addition to the maps shown in the text, several animations are available in *electronic supplementary materials* which show the dynamic results more clearly.

⁷⁰ All processes were run on one computer with the following main characteristics: CPU Intel® Core™ i7-3770 CPU @ 3.40GHz 3.40GHz; RAM 16GB + 4GB from ReadyBoost; Operating System 64-bit Windows 8.

⁷¹ Available for download at: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=755f96fcd454e4e8f790fecb3e031c7>

4.1. Global results

It is interesting to see how each study area responds to changes in infrastructure performance. Figure 3 shows the temporal series for Madrid and Barcelona. In general terms, both have the same pattern, with a sharp loss of accessibility first thing in the morning. After that, for about 7 hours, almost 60% of the accessibility lost during the first peak time is recovered, until around 17:15 hrs., the hour of the worst case in the evening rush. After this second peak, maximum accessibility returns by 21:30 hrs.

However, the absolute value of potential accessibility is different in each area. On average, Madrid has 450,000 more potential market units than Barcelona. This is not surprising considering that there is a greater concentration of population in its study area. Likewise, the value of *average weighted impedance*, which measures effort of access, indicates that, on average, each inhabitant of Barcelona always requires between half a minute and one minute more than someone living in Madrid to access opportunities in that study area. In relative terms, Madrid is less affected by congestion than Barcelona. In the morning peak, the accessibility performance of Madrid is 86.98% of its global potential accessibility value in relation to the free flow situation; it is caused by an increment of 14.15% in its global weighted impedance. For Barcelona, these values are 84.38% and 16.37% respectively. Between peaks, values are stable in global potential accessibility around 92% in Madrid and 90% in Barcelona respect free flow situation, and during afternoon peak, at 17:15, these values drop to 90.85% and 87.91% respectively.

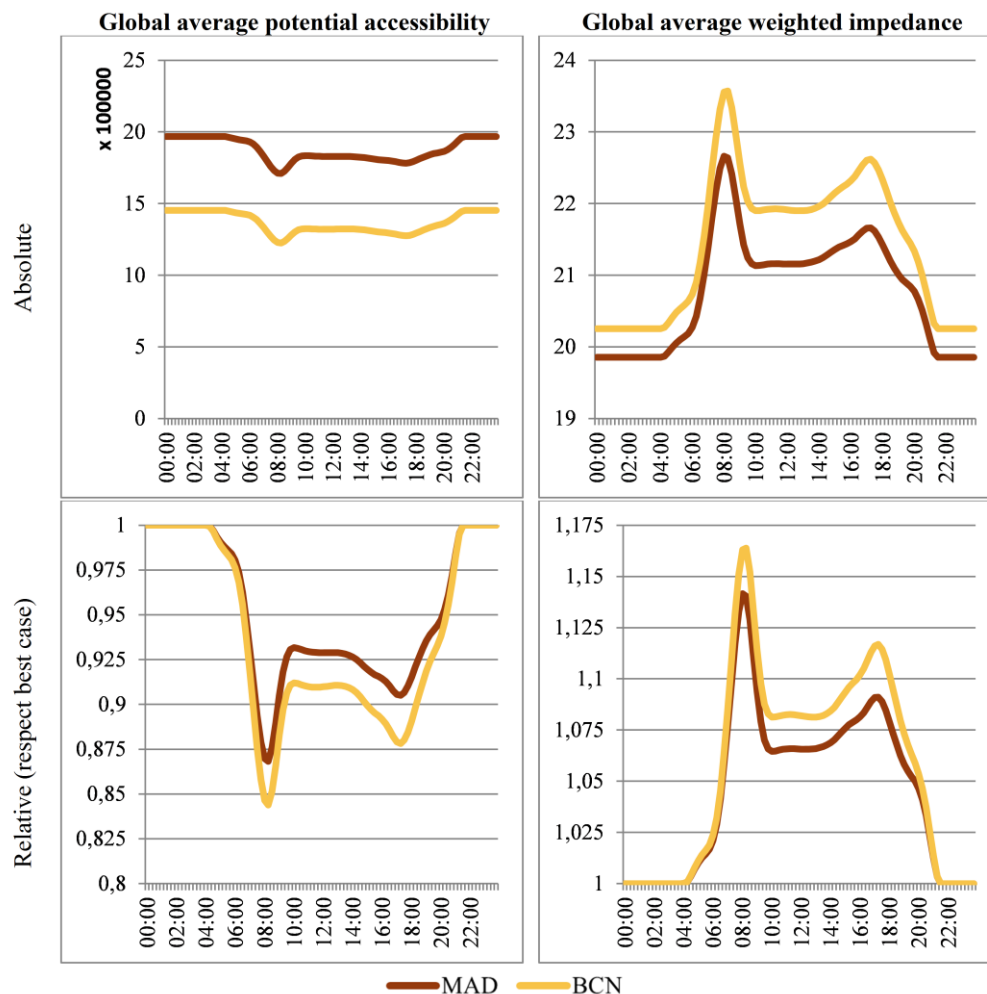


Figure 3. Temporal evolution of the global and relative accessibility value.

4.2. Daily spatial accessibility distribution

Changes in road performance due to traffic congestion do not have a uniform impact on the study areas. As Figure 4 and the supplementary electronic material animations show, using the average weighted travel time (which makes it possible to compare both cities in absolute values). Central areas have less average impedance for reaching opportunities. In the case of Madrid, the resulting contours are concentric, while in Barcelona the area with high accessibility values includes the main city and part of the system of peripheral towns situated around an inland axis parallel to the coast, known as the Mediterranean corridor: AP-7 | E-15 motorway. In both cases, the distribution of zones with greater and lesser accessibility is maintained throughout the day. It should also be noted that, as expected, the effects of congestion begin in the more peripheral zones that are at some distance from a main road. In

the same way, the lowest global accessibility values do not correspond with the minimum values in these more distant zones, this is experienced some minutes earlier.

The rest of the results use relative values obtained from potential accessibility. Figure 5 shows the maximum impact of congestion, i.e. the ratio between the minimum and maximum accessibility recorded in each zone. It also shows the total time that each zone is below its average potential accessibility (amount of time affected by low network performance).

Location, relationships with neighbours zones and each zone's own opportunities inside itself, also known as self-potentials, are essential elements for understanding how temporal changes in network speed affect the spatial accessibility distribution. As Figure 5 shows, each study area behaves differently. Madrid has a large centre with fewer reductions in MPUs between the worst and best recorded situations. The central area also includes the north-central and south-central zones. The zones that experience fewer hours below the average accessibility value are the southern metropolitan areas, being the most congestion-resilient ones. However, in the north-western metropolitan area (along the A-6 motorway corridor), accessibility is reduced by almost 25% at the worst times. Nevertheless, the total number of hours below the average value is low (less than 13). In the north, along the A-1 corridor, the situation is the opposite, with little loss at the peak of worst accessibility but a high number of hours below average value. The zones most negatively affected by congestion in the metropolitan area of Madrid are in the eastern corridor (A-2) with significant reductions between maximum and minimum accessibility values and below average accessibility during much of the day.

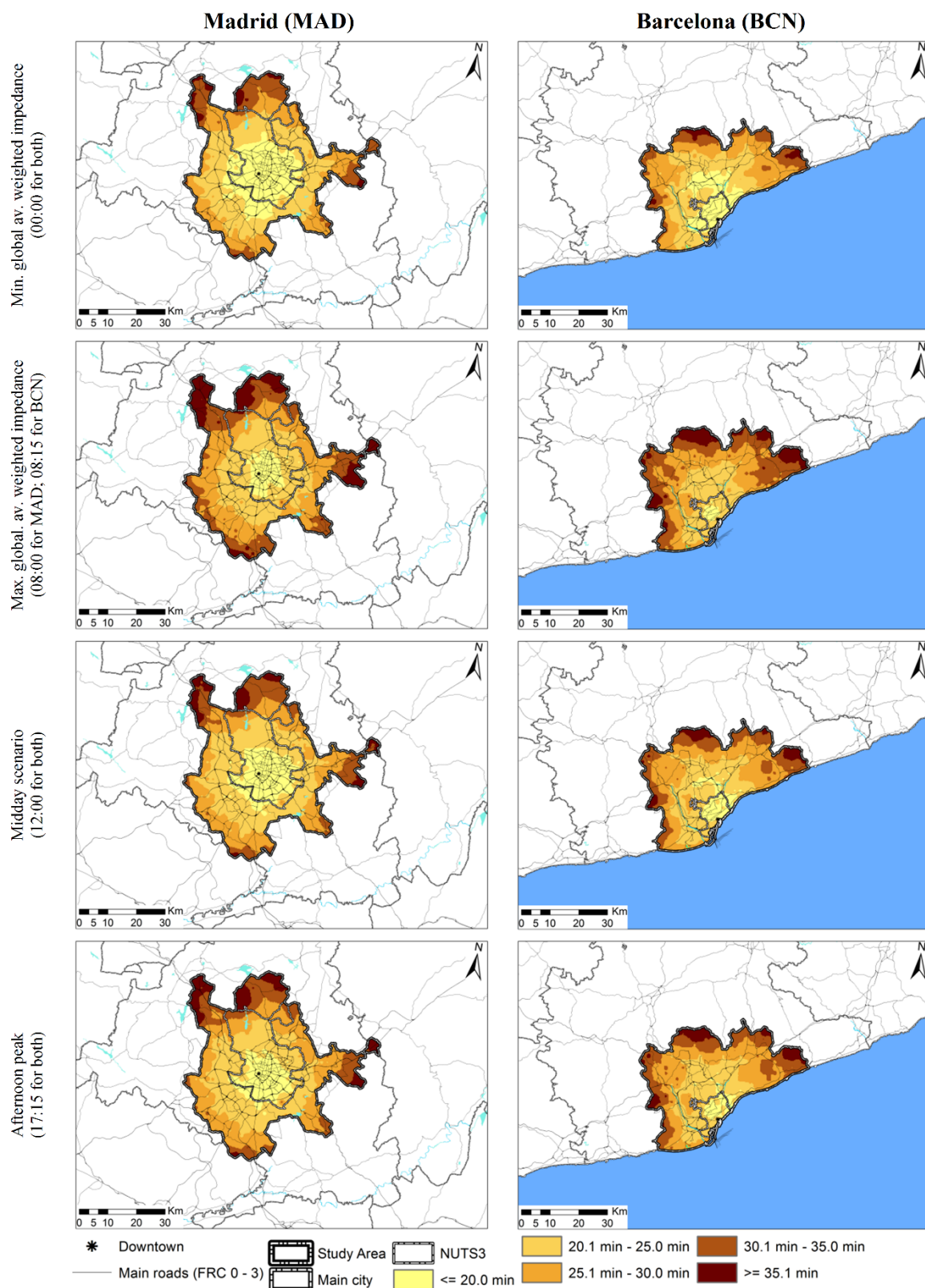


Figure 4: Comparing accessibilities at different times of day.

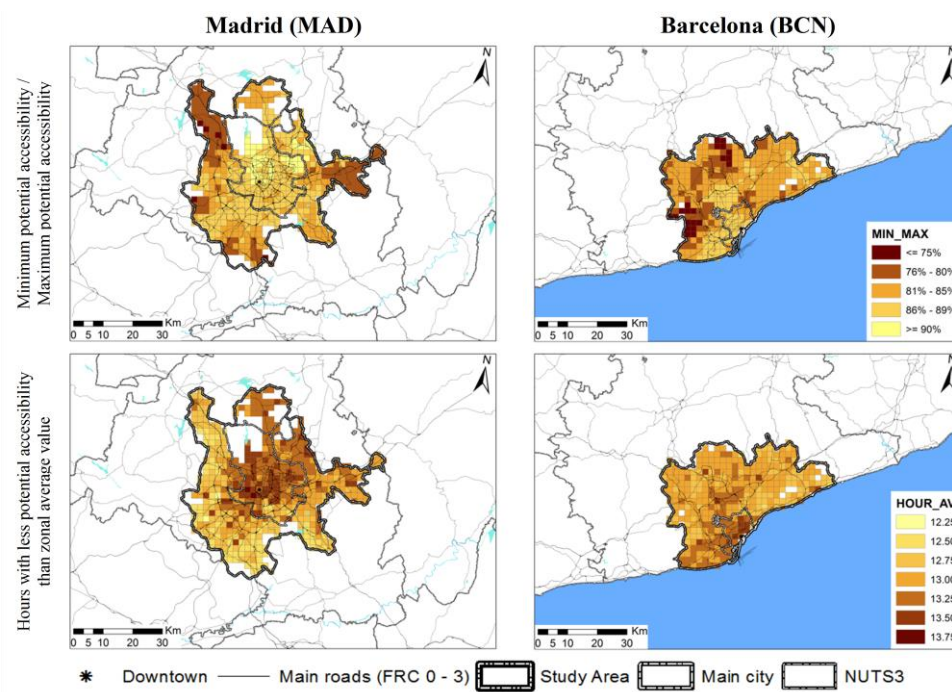


Figure 5: Potential accessibility behaviour patterns.

Unlike Madrid, Barcelona has greater variability in its accessibility distribution. The zones with the least variation between maximum and minimum values are situated in the centre, south-west and north of the main city. However, for most of the day, these zones suffer from values that are lower than their average accessibility. The remaining zones are more affected by peak congestion as they experience greater reductions in accessibility. It is worth noting that part of the so-called “second metropolitan ring of Barcelona”⁷² behaves in a similar fashion to the centre of the city, but with more marked peak reductions in accessibility but few hours below their average values.

Knowing at what time of the day each zone has its lowest potential accessibility value (Figure 6) is of great use for explaining the dynamics of the effects of temporal variation in accessibility. Both cities show the same pattern, with the worst level of accessibility in almost all the study area occurring during the morning, and with an outside-to-inside pattern. However, some zones around the historic centres of the main cities experience their worst congestion during the late afternoon/evening peak. These areas include the centres of the main cities, airports,

⁷² Main cities: Granollers, Mataró, Sabadell and Terrassa.

and a large part of the business parks.

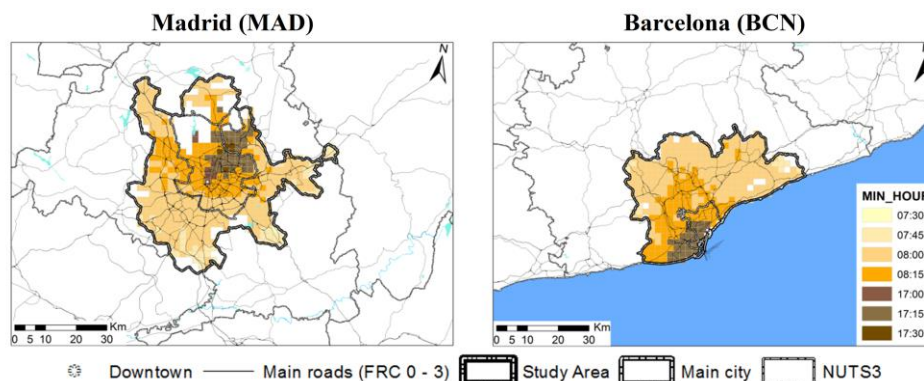


Figure 6: Time with lowest MPUs.

5. Conclusions and future research

The aim of this article is to capture the temporal variation of infrastructure performances in measurements of accessibility. Until now, the lack of reliable data and computational limitations has become obstacles to any in-depth analysis of dynamic phenomena, such as daily accessibility. The starting point of this challenge has been information on road infrastructure performance from the years 2011 and 2012, obtained from observations recorded by thousands of users of GPS navigators (TomTom, 2013a)⁷³. By measuring accessibility with real observed speeds, it is possible to broaden our understanding beyond simply knowing where and when congestion takes place, i.e. at arc level. Also, it will be possible to start answering some questions at origin trips zone or inhabitant level, such as whom it affects, when and how long it affects them, what is the magnitude of these impacts, and, perhaps most importantly, why they are affected.

The article shows how to introduce dynamic impedances in two traditional accessibility measurements using a current ordinary personal computer. Although computational costs are not too high for a single scenario, they can be a factor in determining the temporal interval to use for calculating a complete temporal series. For the purposes of this article, we therefore opted to work with 15-.minute intervals instead of the 5 minutes that were originally envisaged. Apparently, this option did not result in any significant loss in detail of the results. However,

⁷³ TomTom has also some internal nonpublic reports about this data. If you want more information, please contact TomTom.

new techniques as cloud computing can offer us enough resources to easily lead the limits observed on this study with a single computer and get deeper knowledge in dynamic accessibility studies.

The areas of study, Madrid and Barcelona, show similar patterns in the variation of global accessibility, measuring as reachable population, throughout the day. Respecting the spatial distribution of the effects of congestion, each area shows a different result due to the morphology of its respective metropolitan region. In any case, it seems that systems based on strong concentration of opportunities make accessibility more resistant to congestion, as Levine and Garb suggest (Levine & Garb, 2002). This is partly because zones with lower population, and therefore less self-potential, are more dependent on the potential of the other zones and the transport component. Another result worthy of mention is that centres of activity or of economic importance, which experience their worst accessibility in the late afternoon, can easily be identified.

Other variables that exist have not been explicitly included in this article and these variables may explain some of the results obtained. For example, the provision of public transport services may encourage people not to use their private vehicles and therefore not reduce network performances, and their effects are implicitly included on observed speed used on this paper. In-depth analysis of this information is essential in any attempt to avoid the unwanted effects of congestion. Dynamic measurements also imply an important step forward in the search for the elusive but unmistakable relationship between accessibility and mobility that has generated so many scientific discussions (Handy, 2005b). Future research should tackle to find this relationship, as well as how congestion can trigger some reaction on housing or location. They must also include methodologies to efficiently compare different solutions/scenarios.

The present study has focused on origins, which is interesting from the point of view of location policies involving zones that generate journeys (active accessibility), such as new residential developments, zones of denser growth or logistic urban micro-platforms. The same process can also be used for destinations (passive accessibility) to find locations that are resilient to the congestion of services like medical centres and schools. This is of particular interest in public venues that are accessed mainly by road, and it may also be interesting in future research on territorial/social policy

Using only the population data as opportunity values may be very arguable in some

accessibility studies, especially in metropolitan contexts, where the specialization of land use has an important role. Nonetheless, it is worth mentioning each study requires using any good methodology and adequate and available data according to its aims. Moreover, in comparison studies it is really important to get results without biases, e.g. using the very same methodology to get original data or standardizing data. Unfortunately, the only available trustworthy data, for the study areas at 1km² grid level, is population data. In fact, some other socio-economic data available on this detailed level have been generate as function of population (Milego & Ramos, 2013). In our case, access to population can be interesting to show a large number of effects of congestion on the territorial accessibility. Using other type of opportunities should be used to expand the knowledge of this phenomenon and its consequences in other study scope in future research.

As a final comment, it should be pointed out that explaining the consequences of dynamic effects on static maps entails significant difficulties owing to the incorporation of the temporal component. Although the best way of representing this appears to be through animations, it would be interesting to reinvent some static maps that could also capture this information and guarantee the soundness and plainness of the indicators used. This is no trivial aspect as decisions on various actions may depend on it.

6. Acknowledgments

We would like to thank those taking part in NECTAR Cluster 6 on Accessibility and Policy Making held on Feb. 6th and 7th in Seville who contributed to this article with their comments and advice. The authors are also grateful to the Ministry of Economy and Competitiveness of the Spanish Government for funding this research as part of the SPILLTRANS, TRA2011-27095 project. We are also very grateful to the peer reviewers. Their comments were very welcome and they have improved the clearness and utility of this paper.

7. References

- Ben-Akiva, M. E. (1985). Dynamic network equilibrium research. *Transportation Research Part A: General*, 19(5–6), 429–431. [http://doi.org/10.1016/0191-2607\(85\)90042-1](http://doi.org/10.1016/0191-2607(85)90042-1)
- Bertolini, L., le Clercq, F., & Kapoen, L. (2005). Sustainable accessibility: A conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport Policy*, 12(3), 207–220.

<http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.006>

Braess, D. (1968). Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. *Unternehmensforschung*, 12(1), 258–268. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/BF01918335>

Braess, D., Nagurney, A., & Wakolbinger, T. (2005). On a Paradox of Traffic Planning. *Transportation Science*, 39(4), 446–450. <http://doi.org/10.1287/trsc.1050.0127>

Breheny, M. J. (1978). The measurement of spatial opportunity in strategic planning. *Regional Studies*, 12(4), 463–479. <http://doi.org/10.1080/09595237800185401>

Bruinsma, F. R., & Rietveld, P. (1998). The accessibility of European cities: theoretical framework and comparison of approaches. *Environment and Planning A*, 30(3), 499–521. <http://doi.org/10.1068/a300499>

Chabini, I. (1998). Discrete Dynamic Shortest Path Problems in Transportation Applications: Complexity and Algorithms with Optimal Run Time. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1645(1), 170–175. <http://doi.org/10.3141/1645-21>

Chiu, Y.-C., Bottom, J., Mahut, M., Paz, A., Balakrishna, R., Waller, T., & Hicks, J. (2011). Dynamic Traffic Assignment. A Premier (Transport Research Circular No. E-C153). Washington, DC (United States of America). Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec153.pdf>

Curl, A., Nelson, J. D., & Anable, J. (2011). Does Accessibility Planning address what matters? A review of current practice and practitioner perspectives. *Research in Transportation Business & Management*, 2, 3–11. <http://doi.org/10.1016/j.rtbm.2011.07.001>

Dean, B. (2004). Shortest paths in FIFO time-dependent networks: Theory and algorithms. Rapport technique, Massachusetts Institute of Technology. Boston. Retrieved from <http://people.csail.mit.edu/bdean/tdsp.pdf>

Department of Environment, & Department of Transport. (1994). Planning Policy Guidance: Transport (PPG13).

Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271. <http://doi.org/10.1007/BF01386390>

ESPON. (2014). ESPON 2013 Database Dictionary of Spatial Unites. Retrieved January 20, 2014, from http://database.espon.eu/db2/jsf/DicoSpatialUnits/DicoSpatialUnits_onehtml/index.html

ESRI. (2014). About network analysis with hierarchy. Retrieved February 25, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//004700000057000000>. Last accessed on January 21

European Commission. (1999). European spatial development perspective. (European Commission, Ed.). Luxembourg (Luxembourg): European Communities. Retrieved from http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum_en.pdf

European Environment Agency. (2007). EEA reference grids. Retrieved January 20, 2014, from 9B755D9F-8B6B-4CE0-9270-0963E10B2FC8

Eurostat. (2011). Local Administrative Units (LAU). Retrieved January 20, 2014, from http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/nuts_nomenclature/local_administrative_units

Eurostat. (2012). GEOSTAT. Population Distribution Demography 2006. Retrieved January 20, 2014, from <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/population-distribution-demography/geostat>

Frost, M. E., & Spence, N. A. (1995). The rediscovery of accessibility and economic potential: the critical issue of self-potential. *Environment and Planning A*, 27(11), 1833–1848. <http://doi.org/10.1068/a271833>

Furness, K. P. (1965). Time function iteration. *Traffic Engineering and Control*, 7(7), 458–460.

Geurs, K. T., & Ritsema van Eck, J. (2001). Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact. Bilthoven (Netherlands). Retrieved from <https://rivm.openrepository.com/rivm/handle/10029/9487>

Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>

- Gutiérrez, J. (2001). Location, economic potential and daily accessibility: An analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid–Barcelona–French border. *Journal of Transport Geography*, 9(4), 229–242. [http://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00017-5](http://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00017-5)
- Gutiérrez, J., Condeço-Melhorado, A. M., López, E., & Monzón, A. (2011). Evaluating the European added value of TEN-T projects: A methodological proposal based on spatial spillovers, accessibility and GIS. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 840–850. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.10.011>
- Gutiérrez, J., & Urbano, P. (1996). Accessibility in the European Union: the impact of the trans-European road network. *Journal of Transport Geography*, 4(1), 15–25. [http://doi.org/10.1016/0966-6923\(95\)00042-9](http://doi.org/10.1016/0966-6923(95)00042-9)
- Handy, S. (2005). Smart growth and the transportation-land use connection: What does the research tell us? *International Regional Science Review*, 28(2), 146–167. <http://doi.org/10.1177/0160017604273626>
- Handy, S. L., & Niemeier, D. A. (1997). Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives. *Environment and Planning A*, 29(7), 1175–1194. <http://doi.org/10.1068/a291175>
- Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76. <http://doi.org/10.1080/01944365908978307>
- Hodge, D. C. (1997). Accessibility-related issues. *Journal of Transport Geography*, 5(1), 33–34. [http://doi.org/10.1016/S0966-6923\(96\)00050-6](http://doi.org/10.1016/S0966-6923(96)00050-6)
- INE. (2004). Population and Housing Census 2001. Retrieved December 10, 2013, from http://www.ine.es/en/censo2001/index_en.html
- Levine, J., & Garb, Y. (2002). Congestion pricing's conditional promise: Promotion of accessibility or mobility? *Transport Policy*, 9(3), 179–188. [http://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00007-0](http://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00007-0)
- Martens, M. J., & van Griethuysen, S. (1999). The ABC location policy in the Netherlands. Retrieved from <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572236303/abc.pdf>
- Milego, R., & Ramos, M. J. (2013). Disaggregation of socioeconomic data into a regular grid

and combination with other types of data (ESPON). Technical Report, ESPON. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Disaggregation+of+socioeconomic+data+into+a+regular+grid+and+combination+with+other+types+of+data#0>

Morris, J. M., Dumble, P. L., & Wigan, M. R. (1979). Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research Part A: General*, 13(2), 91–109. [http://doi.org/10.1016/0191-2607\(79\)90012-8](http://doi.org/10.1016/0191-2607(79)90012-8)

Ortúzar, J. D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport* (4th ed.). West Sussex (United Kingdom): John Wiley & Sons. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=410941>

Páez, A., Scott, D. M., & Morency, C. (2012). Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators. *Journal of Transport Geography*, 25, 141–153. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016>

Quiroga, C. A. (2000). Performance measures and data requirements for congestion management systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8(1–6), 287–306. [http://doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00008-5](http://doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00008-5)

Reggiani, A. (1999). *Accessibility, Trade and Location Behaviour*. Ashgate Publishing Limited.

Schürmann, C., & Talaat, A. (2000). Towards a European peripherality index. Dortmund (Germany). Retrieved from <http://www.raumplanung.tu-dortmund.de/irpud/pro/struktur/ber41.pdf>

TomTom. (2013). Speed Profiles. Retrieved January 20, 2014, from http://www.tomtom.com/en_gb/licensing/products/traffic/historical-traffic/speed-profiles/#tab:tab1

Vandenbulcke, G., Steenberghen, T., & Thomas, I. (2009). Mapping accessibility in Belgium: A tool for land-use and transport planning? *Journal of Transport Geography*, 17(1), 39–53. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008>

Wu, Y.-H., Miller, H. J., & Hung, M.-C. (2001). A GIS-based decision support system for analysis of route choice in congested urban road networks. *Journal of Geographical Systems*, 3(1), 3–24. <http://doi.org/10.1007/PL00011466>

8. Supplemental material

<https://link.springer.com/article/10.1007/s12544-015-0168-2#SupplementaryMaterial>

- High quality images of the Maps of Madrid.
- Animation daily evolution of average travel time in Madrid.
- High quality images of the Maps of Barcelona.
- Animation daily evolution of average travel time in Barcelona.

Paper 2: The daily dynamic potential accessibility by car in London on Wednesdays

Moya-Gómez, B. and García-Palomares, J.C. (2017). *Journal of Maps*, 13(1), 31–39.
<https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1305301>

Abstract

The map presented in this paper shows the effect of congestion on daily accessibility in the London metropolitan area on Wednesdays. Because of its dynamic nature, it is challenging to both calculate the effects of this phenomenon and to represent it clearly on simple maps. Although we can use many traditional techniques for this purpose, they are usually static, and they may lose some essential information on the effects studied. In this paper, we used two cartographic techniques rarely used in accessibility studies - cartograms and 3D maps, which we believe can achieve a more striking representation in static and animations of both the traffic-induced spatial distortion and the accessibility levels obtained. The results are presented in two animated maps and some snapshots of them –static maps. Both types of maps reinforce each other: Together, they can properly show the direct space-time link between congestion and accessibility, and can, therefore, give a more detailed overview of the consequences of this phenomenon.

Keywords: Dynamic maps, 3D maps, time cartogram, dynamic accessibility, congestion, London.

1. Introduction

Accessibility is a key concept in land use and transport policies across the world. Several recent reviews have highlighted the huge importance of accessibility for policymakers and society, transport geography, and other research areas, and have proposed new research challenges (see Geurs, De Montis, & Reggiani, 2015; Páez, Scott, & Morency, 2012; van Wee, 2016). Although accessibility has been used as an indicator in many spatial scopes and from various perspectives, it is usually used in the context of static studies. In other words, most accessibility studies consider each variable as a single and static value within each study scenario. With regard to accessibility studies, one of the challenges faced by tomorrow's (or even today's) researchers is to improve space-time data input methods (Geurs & Van Wee,

2004).

Accessibility is a dynamic attribute of location/person. It truly changes over time due to changes in travel times caused by changes in the transport network (e.g. congestion, disruptions...), to changes in opportunities, e.g. opening hours, or changes in individual mobility capabilities. So, accessibility could be used to measure impacts of dynamic effects on territories, e.g. congestion or changes in levels of service in metropolitan areas. Indeed, congestion assessment, being directly related to evaluating the importance of the robustness, reliability, vulnerability, resilience or flexibility of the transport system (Van Wee, 2016), will underpin future accessibility studies. Until recently, dynamic data was very scarce but now Information and Communication Technologies (ICT) are greatly facilitating access to it. Companies such as TomTom®, Inrix® or Be-Mobile®, or accessed freely and easily from Here, Google® Maps/Transit, or OpenStreetMaps supply it – some cases by new standardization templates, e.g. Google Transit Feed Specification (GTFS). On the other hand, dynamic data is larger than traditional data. We can properly use them by Big Data techniques and increased calculation capacity, for example, cloud-computing. These technological improvements have led to a growing field of research involving time-of-day variations in private and public transit accessibility (Geurs et al., 2015)

An increasing number of studies have focused on the effects of time variations in transport system performance on accessibility. However, road congestion studies are still based on static scenario comparison methods. These papers generally consider some peak (unrealistic) and off-peak (based on legal or free flow conditions) moments and base their comparison of accessibility in these scenarios on the assumption of unvarying road network performance. This methodology has been used to describe the spatial structure of vehicle accessibility to towns and railway stations during peak and off-peak hours in Belgium (Vandenbulcke et al., 2009), and the spatial distribution of car travel times in the Greater Toronto Area (Canada) in 4 static design/averaged scenarios (M. N. Sweet et al., 2015). Other studies have also been conducted on the effect of including unique congestion values and turn penalties in travel time calculations in Edmonton (Canada) (Yiannakoulis, Bland, & Svenson, 2013).

Studies analyzing public transport, however, we may consider variations in the characteristics of the transport network, should they be reflected in the timetables used by different means of transport. Nevertheless, comparisons with car travel times continue to be based on static road networks. For example in the spatial distribution of travel time differences between car and

public transport during morning peak and noon conditions in the Flanders region (Belgium) (Dewulf et al., 2015), or in the comparison of accessibility by public transport (with and without changes between lines) and by car in Tel Aviv (Israel) for morning peak and noon scenarios (Benenson, Martens, Rofé, & Kwartler, 2011). Consequently, these simplifications of road networks lead to present the findings using different types of static maps that can only show a snapshot of the calculated situation, thus eliminating substantial information, such as the degree of daily changes in accessibility on the territory.

The aim of this study is to explore how static and dynamic cartographic techniques are capable of showing the sequence of variations in car accessibility resulting from speed changes in the road network of London (UK). The map presented in this paper should be as useful in clarifying the impact of congestion in metropolitan areas as those used in other largely time-dependent fields such as meteorology.

The article is divided into the following sections: Section 2 briefly summarizes the different cartographic techniques suitable for the purpose of our study, together with techniques used in earlier studies on accessibility and congestion. Section 3 presents the study variables and the data collection method used. Section 4 details the cartographic techniques used in this analysis. Finally, section 5 outlines our conclusions and proposes lines for future research.

2. Old techniques in new maps

Dynamic accessibility analysis involves analyzing how to use static mapping techniques in dynamic studies without sacrificing soundness and plainness (Bertolini et al., 2005). Accessibility is usually mapped using different types of cartographic representations, the most common types being choropleth maps, grids or contour, although other graphically powerful maps have also been used.

Choropleth maps, which use colors to represent accessibility levels by region, are the most widely used in accessibility studies. Obviously, the smaller the size of regions means more accurate results are presented on the map. Several previous studies on accessibility and congestion have presented their results on choropleth maps (see Benenson et al., 2011; Sweet et al., 2015; Vandenbulcke et al., 2009). Grid maps, which are a type of choropleth map, use uniform spaced zones. The advantage of using regular grid data is we could overcome some aspects of the Modifiable Areal Unit Problem (MAUP) (Kwan & Weber, 2008; Klaus Spiekermann & Wegener, 1999), and we can show absolute values because the area is

known. Several studies on accessibility have based their data and represented their findings on grid maps (Cheng & Bertolini, 2013; Martin, Wrigley, Barnett, & Roderick, 2002; Páez et al., 2012; Salonen & Toivonen, 2013). The interpretability of both choropleth and grid maps, together with their variations over time, strongly depend on the definition of the value range associated with each color in the legend. These maps can also be extruded to obtain some 3D representations and show the exact values.

Another common method of mapping accessibility or its components involves continuous surfaces created by the interpolation of data points. The most common interpolation maps are Contour maps, also known as heat maps, which are 2D representations of these surfaces. Contour maps use colors and isolines to represent the accessibility value surfaces (Gutiérrez & Urbano, 1996; Ortega, Quintana, & Pastor, 2011; Owen & Levinson, 2014). However, although contour maps are a powerful tool for depicting interpolation results, they are rarely used for 3D maps. In this representation, high accessibility levels appear as 'mountains', whereas 'valleys' represent low accessibility values (see Spiekermann & Wegener, 1996). Gradient colors and isolines also help ensure the interpretability of 2D and 3D surface representations.

Other, less commonly used, techniques for representing accessibility findings are cartograms or anamorphosis maps. This technique is based on distorting geographical areas according to the values to be mapped, thus allowing the results of the accessibility analysis to be presented in a more specific and attractive format. For linear data, octilinear cartograms simplify the geographical representation of transport networks by representing elements exclusively by horizontal or vertical lines, or 45° angles (Condeço-Melhorado, Christidis, & Dijkstra, 2015). Other interesting techniques are time-space maps, in which elements are organized in such a way that the distances between them are not proportional to their physical distance, but to the travel times between them (Axhausen, Dolci, Fröhlich, Scherer, & Carosio, 2008; Shimizu & Inoue, 2009; Klaus Spiekermann & Wegener, 1994; Ullah & Kraak, 2014). Some of them are presented in animated maps, which have the power to clearly explain the phenomenon studied (ITC - Universiteit Twente, 2011). However, they require higher computational cost algorithms to avoid excessive deformations that would prevent users from recognizing the geographical shapes.

3. Methodology

3.1. Dynamic Accessibility Measure

Accessibility is a complex measure with many possible measurement techniques (Geurs & Van Wee, 2004). We have used a modified potential accessibility (Hansen, 1959) zone-based indicator to measure the effects of congestion on territorial vehicle accessibility. Its values are obtained from the number and the cost of reaching opportunities from any origin. We can understand the results of this indicator as the sum of accessible opportunities weighted by the value of their impedance according to an impedance-decay function. The shortest routes were calculated using the heuristic version for dynamic FIFO networks of ESRI® ArcGIS 10.1 (see Chabini, 1998; Dean, 2004). Equation A shows the definition of accessibility and impedance estimation.

$$A_i^t = \sum_{j \in N} D_j \cdot e^{\beta \cdot c_{ij}^t}; \forall i \in N, t \in T$$

subject to: (A)

$$c_{ij}^t = \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} \alpha_{eij}^{tm} \cdot c_e^m; \forall ij \in G, t \in T$$

Where:

A_i^t is the potential accessibility value of origin i , beginning at instant t .

D_j is the opportunities of destination j . In this paper, opportunities are measured as 2006 population (Eurostat (2012)).

$e^{\beta \cdot c_{ij}^t}$ is the impedance-decay function (no-cost trips equal= weight one).

β is the parameter. In our case, we used $\beta = -0.065$. We used the same parameter as Moya-Gómez and García-Palomares (2015)

c_{ij}^t is the impedance experienced when travelling from origin i to destination j by the shortest route, beginning at instant t . On this paper, the impedance is the travel time [min].

α_{eij}^{tm} is the binary variable that indicates whether network link e is used for the trip between origin i and destination j which has begun at instant t , starting at instant m ,

c_e^m is the expected impedance of network link e , use of which begins at instant m . In this study, the expected time is the travel time [min]

N represents all the zones included in the calculation area.

G is the set of origin-destination relationships, including relation with itself (origin i = destination j)

T is the set of instants of started trips.

M is all possible instants within the study.

We also calculated the global accessibility profile, as expressed in the weighted average (Equation B) in order to understand the average absolute potential accessibility:

$$A_{global}^t = \frac{\sum_{i \in N} A_i^t \cdot O_i}{\sum_{i \in N} O_i}, \forall t \in T \quad (B)$$

Where:

A_{global}^t is the global weighted accessibility value, when trips start at instant t

O_i is the weight or potential of origin i (in our case, population).

Notice that we just added time variability to create the appropriate comparative framework for studying the direct dynamic congestion effect: the shortest travel time route for each origin-destination relationship depends on different instances of departure and dynamic network performance. Opportunity values and decay function definition need to be unique. In the reality, they also change throughout the day (Y. Chen et al., 2011), or due to the trip purpose (Department of Transport, 2014).

3.2. Study Area and Data

The city of London (UK) and its Largest Urban Zone (LUZ) is the most populous and one of the largest metropolitan areas in the EU (ESPON, 2014a). In 2013, TomTom® ranked it as the fourteenth most congested urban zone in the whole of Europe (TomTom, 2013b).

On this paper, we defined the metropolitan area of London as all LAU1 entities that have more than 50% of their territory within a density isoline of 500 inhabitants/km² from the main city. We divided these municipalities into a regular grid of 2x2 km (4km²) cells based on the 1 km² EEA reference grid (Figure 1) (Eurostat, 2012). These were our Origin and Destination zones, and their population in 2006 were the opportunity values. We also used all external cells that can be reached via the network from inside the study area within 15 minutes at midnight, to avoid border effects. The downtown cell contains the Charing Cross station.

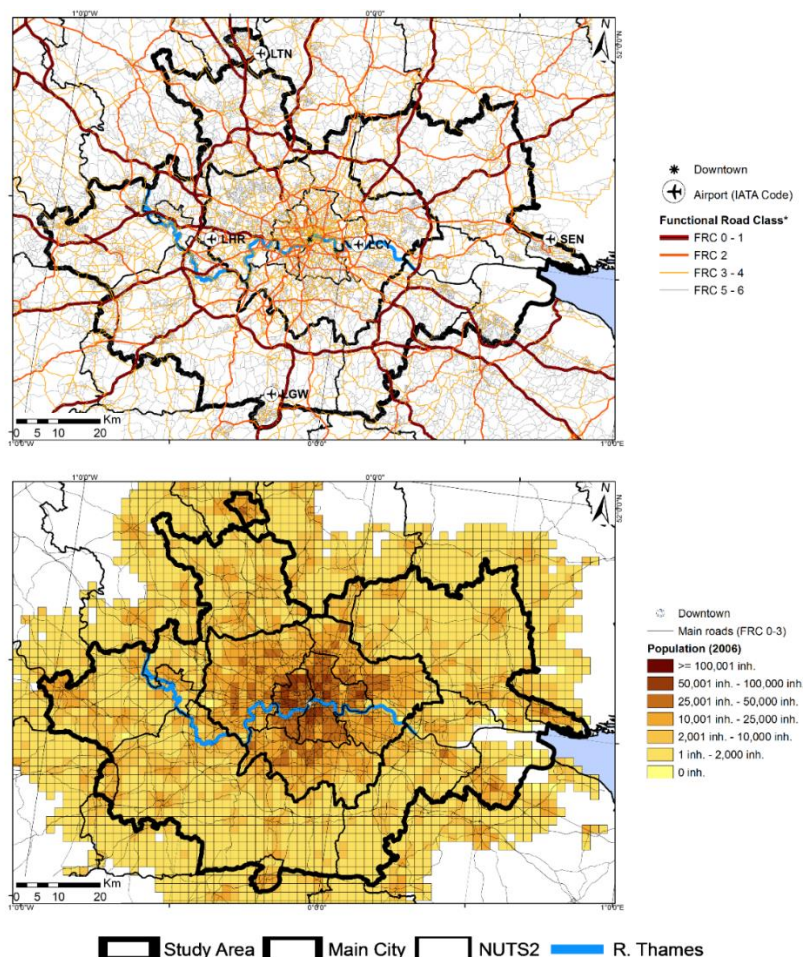


Figure 1. The metropolitan area of London.

The transport network was a subset of the TomTom® UK road network (March 2013 version). We only used links in categories 0 to 6 of the Functional Road Classification (FRC)⁷⁴. TomTom® Historical Speed Profile provided network speeds. It is made up of the speed values observed every 5 minutes (TomTom, 2013b), as a percentage of the speed at each moment with reference to the observed free flow speed. In the March 2013 version, speed values between 2011 and 2012 were used. Each link and direction were assigned 1 of the 98 predetermined profiles for each weekday, provided it had a minimum of 1,000 observations every 5 minutes and for each day. The resulting network is fully connected and incorporates all roads and the main urban network. For London Area, our network length is 17,354 km, and 91.10% of drivable lanes, e.g. both direction edges count double, has a Speed Profile, see Figure 2.

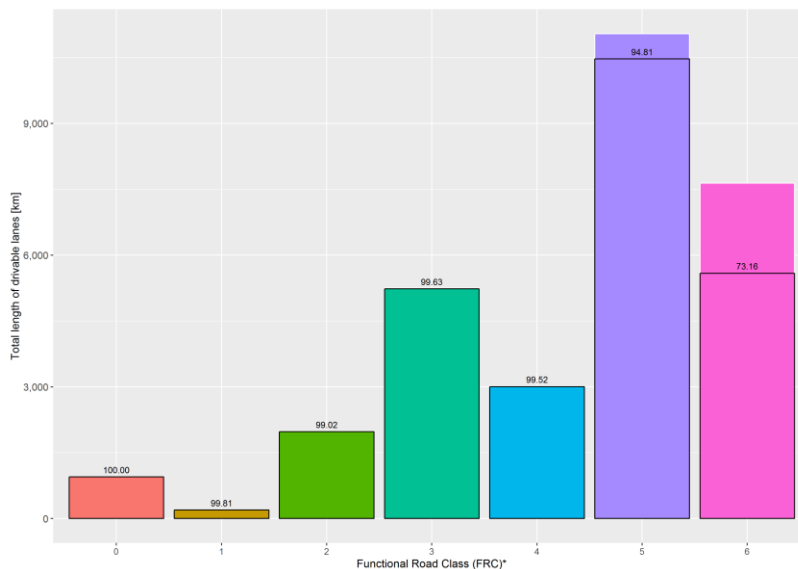


Figure 2. Kilometers of UK road network by category. The back bars are km with speed profiles (showing percentage).

4. Construction of the main map

In order to show the dynamic effect of congestion on accessibility in an easily understandable way, we used two sets: *a)* isolinear cartograms, and *b)* 3D maps created by extruding the study grid zones. The results of both sets (Main Map) are static maps and animation. For this purpose, we first generated a series of maps of each scenario, ordered chronologically. These

⁷⁴ TomTom®'s FRC Definitions. FRC 0: Motorway, Freeway, or Other Major Road; FRC 1: a Major Road Less Important than a Motorway; FRC 2: Other Major Road; FRC 3: Secondary Road; FRC 4: Local Connecting Road; FRC 5: Local Road of High Importance; FRC 6: Local Road; FRC 7: Local Road of Minor Importance; FRC 8: Other Roads.

were later combined to form a single animation (each second shows 4 scenarios, i.e., 1 observational hour) The maps have been stripped of all elements that would prevent the observer from focusing on the data of interest. Static maps and animations are made up of the very same images in each set. We also included the results of the Average Absolute Potential Accessibility to identify the general pattern and congestion impacts.

In this case, the impedance parameter for evaluating accessibility is the travel time between 2 centroids, generating a scenario every 15 minutes. This gives a total of 96 scenarios per day. To facilitate observation, the 2013 version of NUTS 2 territorial divisions (ESPON, 2014b), the (schematic) study area, the River Thames, the city center and the location of Luton (LTN), London City (LCY), Southend (SEN), Gatwick (LGW), and Heathrow (LHR) airports are the same in all maps and animations (Figure 1).

The first map set (Video 1 and Map A in the static map), created entirely with ArcMap 10.4, is based on isolinear cartograms. These cartograms are a visual representation of the way in which transport distorts geographical perceptions, and how congestion distorts the distortion capacity of transport. As can be seen, a "nearby" location can become "far away" due to congestion (this is the basis of our dynamic accessibility study). For this reason, we have mapped the distortion of territorial divisions, the River Thames and the location of the airports (Figure 3) with respect to a single point (London downtown) for both directions of travel. This representation facilitates interpretation of the effect of congestion on travel time by car by transforming isolines into concentric circles (Figure 3). The map construction process was divided into the following stages (Table 1):

Once	Step 1	Convert each polyline into points, i.e. find their vertices and intermediate points (in our case, maximum allowed distance was 250m).
	Step 2	Obtain the coordinates of all points (previous step result and other point features).
	Step 3 ^a	Obtain the unit vector between the central point (in our case Downtown) and step 2 points.
Once per scenario	Step 4 ^b	Interpolate the impedance surface, e.g. using IDW. Interpolating points were Origin/Destination centroids.
	Step 5 ^b	Assign a module (impedance) according to the previous surface.
	Step 6 ^a	Obtain the "distorted" position of each point (central point + module · unit vector).
	Step 7	Rebuild/Redraw lines.
a This step is a sub-step of Ullah and Kraak 's Step I (Ullah & Kraak, 2014)		
b We could have avoided this step if we had used distorting points as Origin/Destination points. That strategy would require more computation effort that could have greatly distorted the geography component.		

Table 1. Time cartogram construction process.

Note how this methodology does not prevent point overlapping or overtaking, as their position with respect to the study point only depends on their direction and the impedance value in each scenario.

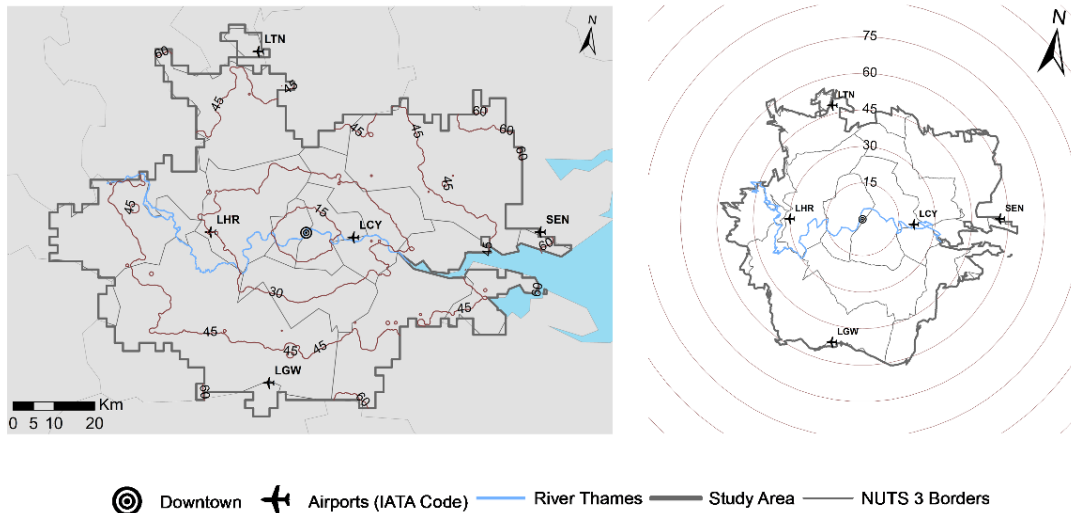


Figure 3. Travel time from Downtown in Free Flow Speed scenario (21:30 – 02:15)

(left: geographic map; right: time cartogram).

The London metropolitan area, distorted according to the travel time to and from the city, is seen to "grow" in size as congestion increases travel times throughout the day. Figure 4⁷⁵ and Table 2 show changes in the surface area caused by congestion-induced territorial distortion. At peak times, the resulting area is 60% larger than at free flow times.

Start traveling at	From Downtown	To Downtown
08:00	127.34	162.79
12:00	128.35	129.80
17:00	161.08	140.28
22:00 (21:20 – 02:15)	100.00	100.00

Table 2: Relative time-distorted area.

⁷⁵ We should change some items of the Legend to be clearer.

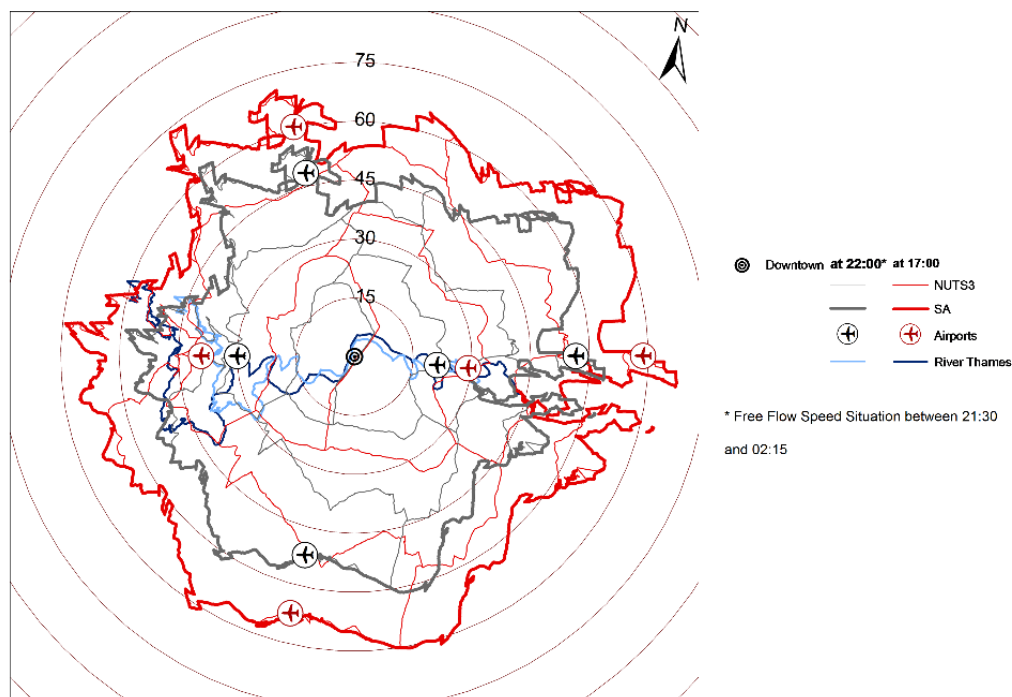


Figure 4. How congestion distorts London from Downtown.

The second map set (Video 2 and Map D in the Static Map) is made up by extruding the different accessibility levels obtained in each grid cell and each scenario. The height and color of each column depend on the accessibility level represented (Figure 5). Although accessibility is reduced as congestion increases, dynamic mapping of variations in absolute values can show subtle changes, mask results, or even lead to misinterpretation. For example, we could evaluate a tiny percentage loss as a high loss in any area with initially high values. We avoided this in 2 ways: by showing absolute accessibility values (free flow situation - midnight) in a separate map to be used as a reference, and by mapping congestion-induced accessibility changes (animation) using the same technique, but where height represents the percentage of accessibility in a particular scenario with respect to the same percentages shown in the reference map. In this way, free flow periods are shown with the same height in all zones. The minimum value shown on the main map is 50% of accessibility in free flow periods. This allows us to show waves of relative loss of accessibility during the day and their distribution over the 24-hour period.

The view shown minimizes the number of zones that could have remained hidden behind other zones due to differences in height. To facilitate understanding, linear elements have also been extruded, and visual continuity is ensured by showing vertical lines on columns whenever

required. Point elements have also been mapped.

5. Conclusions and future research

Access to vast new data sources (Big Data) and the availability of new analysis techniques has improved the scope and accuracy of territorial studies. However, these tools are not without their risks and challenges (Kitchin, 2013), and can call for a review of methodology and hypotheses. Although conventional mapping techniques are still useful and necessary for representing study outcomes, they are sometimes unable to transmit some aspects of the data, and must, therefore, be adapted to these new techniques. Dynamic accessibility studies, in which findings are not dependent on the status of the road network and/or traffic opportunities at a specific time, but rather on how the network changes throughout a trip to reach the destination, is a good example of this need for change.

This study has shown that animation techniques can represent phenomena inherent to dynamic systems, such as trends, which cannot be correctly explained or can only be partially explained, using static techniques (compare animation and static map). Nevertheless, because of their ephemeral nature, animations should only be used to show information that will clarify the message in the most striking way possible, for example, using colors, height, and distortion. Any stationary element that could undermine the simplicity of the animation should only be represented on a static map. Animations and static maps reinforce each other, the combination of animations and static maps used in this study clearly explains the uneven distribution of the impact of congestion in terms of both time and geography. This technique shows which areas are affected by congestion, rather than the network arcs where congestion occurs.

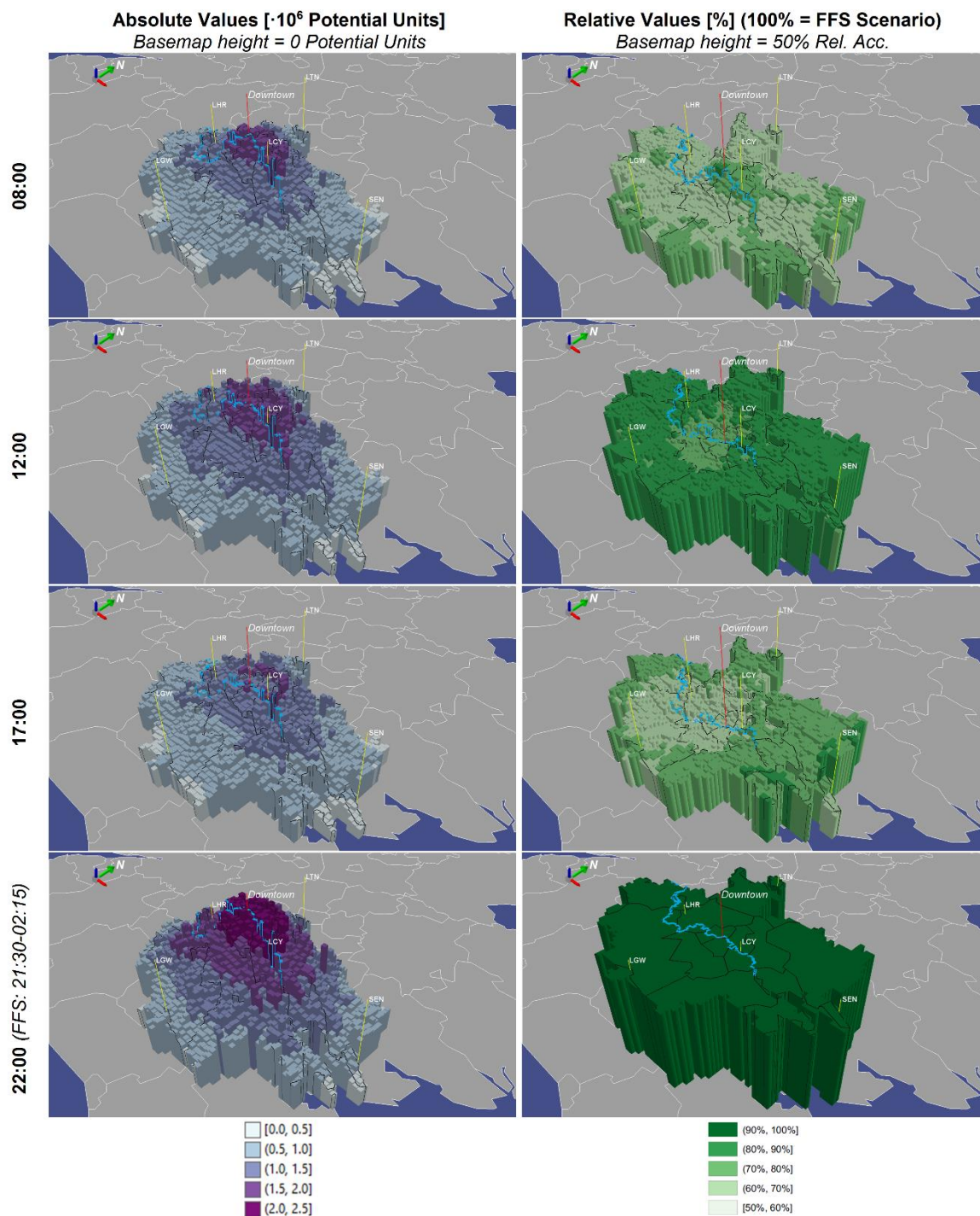


Figure 5. Accessibility in London on Wednesdays.

Finally, our maps still follow the paradigm of showing what the author wants to show. We have not explored other, and potentially highly useful, representations of our results that involve a certain degree of user interaction, such as the zone on which the dynamic cartograms are focused, or the 3D view of the data. This interactive presentation could potentially be resolved

following web-based models. We are also finding other visualization options to properly show the effects of this phenomenon and how other researchers could do it.

6. Software

The maps using in this study were created with ArcGIS 10.1 - 10.4: ArcMap was used to create the cartograms, and ArcScene to create 3D maps. Travel times between origin and destination zones were generated by the OD Cost Matrix feature of the Network Analyst tool. Various customized Python scripts were generated to calculate accessibility based on the cost matrix, to automatically export and adjust the maps included in the animations. The animations were created using Photoscape and the Static Map was created using Adobe Illustrator CS6.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge funding from the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness as part of the SPILLTRANS, (TRA2011-27095) project, the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and the European Regional Development Fund (ERDF) as part of DynAccess (TRA2015-65283-R) project, and the ICT Theme of the European Union's Seventh Framework Program as part of INSIGHT (GA 611307) project.

References

- Axhausen, K. W., Dolci, C., Fröhlich, P., Scherer, M., & Carosio, A. (2008). Constructing Time-Scaled Maps: Switzerland from 1950 to 2000. *Transport Reviews*, 28(3), 391–413. <http://doi.org/10.1080/01441640701747451>
- Benenson, I., Martens, K., Rofé, Y., & Kwartler, A. (2011). Public transport versus private car GIS-based estimation of accessibility applied to the Tel Aviv metropolitan area. *The Annals of Regional Science*, 47(3), 499–515. <http://doi.org/10.1007/s00168-010-0392-6>
- Bertolini, L., le Clercq, F., & Kapoen, L. (2005). Sustainable accessibility: A conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport Policy*, 12(3), 207–220. <http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.006>
- Chabini, I. (1998). Discrete Dynamic Shortest Path Problems in Transportation Applications: Complexity and Algorithms with Optimal Run Time. *Transportation Research Record: Journal*

of the Transportation Research Board, 1645(1), 170–175. <http://doi.org/10.3141/1645-21>

Chen, Y., Ravulaparthi, S., Deutsch, K., Dalal, P., Yoon, S., Lei, T., ... Hu, H.-H. (2011). Development of Indicators of Opportunity-Based Accessibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2255(2), 58–68. <http://doi.org/10.3141/2255-07>

Cheng, J., & Bertolini, L. (2013). Measuring urban job accessibility with distance decay, competition and diversity. *Journal of Transport Geography*, 30, 100–109. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.03.005>

Condeço-Melhorado, A. M., Christidis, P., & Dijkstra, L. (2015). Travel speed changes along the European core road network for the period 1960–2030: an application of octilinear cartograms. *Journal of Maps*, (November), 1–4. <http://doi.org/10.1080/17445647.2015.1088482>

Dean, B. (2004). Shortest paths in FIFO time-dependent networks: Theory and algorithms. Rapport technique, Massachusetts Institute of Technology. Boston. Retrieved from <http://people.csail.mit.edu/bdean/tdsp.pdf>

Department of Transport. (2014). Accessibility Statistics: Travel time calculation methodology. Retrieved from <http://assets.dft.gov.uk/statistics/series/accessibility/accessibility-statistics-methodology.pdf>

Dewulf, B., Neutens, T., Vanlommel, M., Logghe, S., De Maeyer, P., Witlox, F., ... Van de Weghe, N. (2015). Examining commuting patterns using Floating Car Data and circular statistics: Exploring the use of new methods and visualizations to study travel times. *Journal of Transport Geography*, 48(December), 41–51. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.08.006>

ESPON. (2014a). ESPON 2013 Database Dictionary of Spatial Unites. Retrieved January 20, 2014, from http://database.espon.eu/db2/jsf/DicoSpatialUnits/DicoSpatialUnits_onehtml/index.html

ESPON. (2014b). NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics. Retrieved January 20, 2014, from http://database.espon.eu/db2/jsf/DicoSpatialUnits/DicoSpatialUnits_html/ch01s01.html

Eurostat. (2012). GEOSTAT. Population Distribution Demography 2006. Retrieved January 20, 2014, from <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/population-distribution-demography/geostat>

Geurs, K. T., De Montis, A., & Reggiani, A. (2015). Recent advances and applications in accessibility modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, 82–85. <http://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.09.003>

Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>

Gutiérrez, J., & Urbano, P. (1996). Accessibility in the European Union: the impact of the trans-European road network. *Journal of Transport Geography*, 4(1), 15–25. [http://doi.org/10.1016/0966-6923\(95\)00042-9](http://doi.org/10.1016/0966-6923(95)00042-9)

Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76. <http://doi.org/10.1080/01944365908978307>

ITC - Universiteit Twente. (2011). Animated cartogram showing train travel time in the Netherlands. the Netherlands (EU): Youtube. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=9Ayj-80e1w0>

Kitchin, R. (2013). Big data and human geography: Opportunities, challenges and risks. *Dialogues in Human Geography*, 3(3), 262–267. <http://doi.org/10.1177/2043820613513388>

Kwan, M.-P., & Weber, J. (2008). Scale and accessibility: Implications for the analysis of land use–travel interaction. *Applied Geography*, 28(2), 110–123. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.002>

Martin, D., Wrigley, H., Barnett, S., & Roderick, P. (2002). Increasing the sophistication of access measurement in a rural healthcare study. *Health and Place*, 8(1), 3–13. [http://doi.org/10.1016/S1353-8292\(01\)00031-4](http://doi.org/10.1016/S1353-8292(01)00031-4)

Moya-Gómez, B., & García-Palomares, J. C. (2015). Working with the daily variation in infrastructure performance on territorial accessibility. The cases of Madrid and Barcelona. *European Transport Research Review*, 7(2), 1–13. <http://doi.org/10.1007/s12544-015-0168-2>

- Ortega, E., Quintana, S. M., & Pastor, I. O. (2011). Road and railway accessibility atlas of Spain. *Journal of Maps*, 7(1), 31–41. <http://doi.org/10.4113/jom.2011.1167>
- Owen, A., & Levinson, D. (2014). *Access Across America: Transit 2014*. Minneapolis (Minnesota - United States of America).
- Páez, A., Scott, D. M., & Morency, C. (2012). Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators. *Journal of Transport Geography*, 25, 141–153. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016>
- Salonen, M., & Toivonen, T. (2013). Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport. *Journal of Transport Geography*, 31, 143–153. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.06.011>
- Shimizu, E., & Inoue, R. (2009). A new algorithm for distance cartogram construction. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(11), 1453–1470. <http://doi.org/10.1080/13658810802186882>
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (1994). The shrinking continent: new time - space maps of Europe. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21(6), 653–673. <http://doi.org/10.1068/b210653>
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (1996). Trans-European Networks and Unequal Accessibility. *European Journal of Regional Development*, 4(96), 35–42.
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (1999). Freedom from the Tyranny of Zones : Towards New GIS-based Spatial Models. In A. S. Fotheringham & M. Wegener (Eds.), *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models* (pp. 45–61). London (the United Kingdom): Taylor and Francis.
- Sweet, M. N., Harrison, C. J., & Kanaroglou, P. S. (2015). Gridlock in the Greater Toronto Area: Its geography and intensity during key periods. *Applied Geography*, 58, 167–178. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.011>
- TomTom. (2013). TomTom European traffic index. Retrieved from <http://www.tomtom.com/lib/doc/trafficindex/2013-0129-TomTom> Congestion-Index-2012Q3europe-km.pdf

Ullah, R., & Kraak, M.-J. (2014). An alternative method to constructing time cartograms for the visual representation of scheduled movement data. *Journal of Maps*, (July 2014), 1–14. <http://doi.org/10.1080/17445647.2014.935502>

van Wee, B. (2016). Accessible accessibility research challenges. *Journal of Transport Geography*, 51, 9–16. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018>

Vandenbulcke, G., Steenberghen, T., & Thomas, I. (2009). Mapping accessibility in Belgium: A tool for land-use and transport planning? *Journal of Transport Geography*, 17(1), 39–53. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008>

Yiannakoulis, N., Bland, W., & Svenson, L. W. (2013). Estimating the effect of turn penalties and traffic congestion on measuring spatial accessibility to primary health care. *Applied Geography*, 39, 172–182. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.003>

Supplemental material

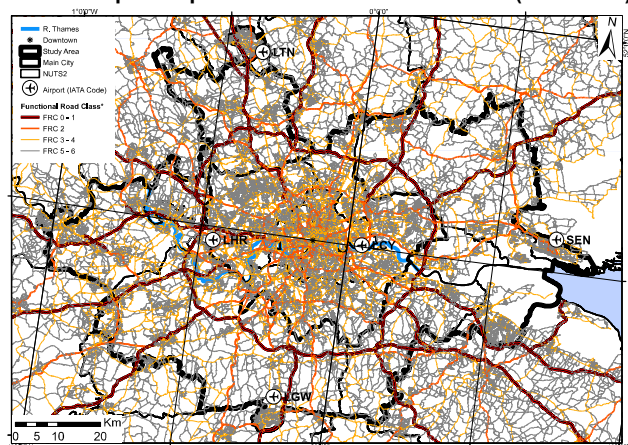
<https://www.tandfonline.com/doi/suppl/10.1080/17445647.2017.1305301?scroll=top>

- Main map.
- Video 1: isolinear cartograms of daily travel time from/to Downtown in London.
- Video 2: 3D daily accessibility results in London.

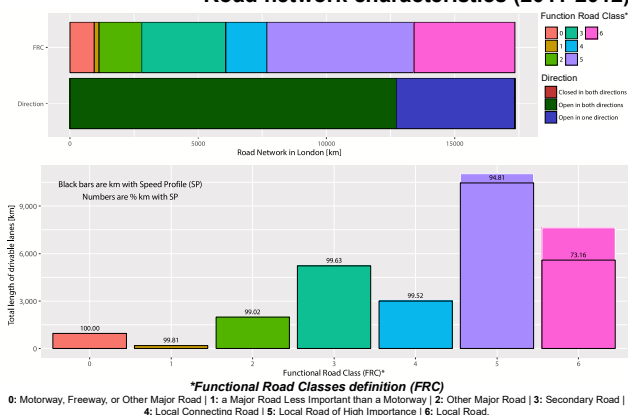
Main Map (*following two pages*)

Input Data and Methods

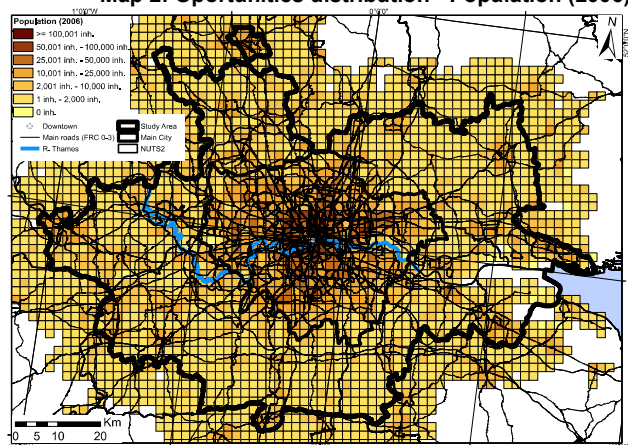
Map 1: Airport location and road network (2011-2012)



Road network characteristics (2011-2012)



Map 2: Opportunities distribution - Population (2006)



Map 1 and Map 2 characteristics

Projection: Lambert Azimuthal Equal Area (LAEA) - Datum ETRS_1989
Scale: see graphical scale (same scale in both maps)

Data sources

Population: Population Distribution - Demography 2006: Eurostat
Road Network and Speed Profiles: TomTom(R) MultiNet and Historical Speed Profile (version 2013Q2)

Dynamic Zonal Absolute Potential Accessibility (3Dmaps C)

$$A_i^t = \sum_{j \in N} D_j \exp^{\beta d_{ij}}, \forall i \in N, t \in T$$

s.t.

$$c_{ij}^t = \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} \alpha_{c_{ij}^m}^t c_e^m, \forall ij \in G, t \in T$$

Line graph B is the weighted by population averaged value of A_i^t

Dynamic Zonal Relative Potential Accessibility (3Dmap D and Video 2)

$$RA_i^t = 100 \frac{A_i^t}{A_i^{FFS}}, \forall i \in N$$

Notice

The authors would like to encourage readers to look at Videos on Supplemental Online Material

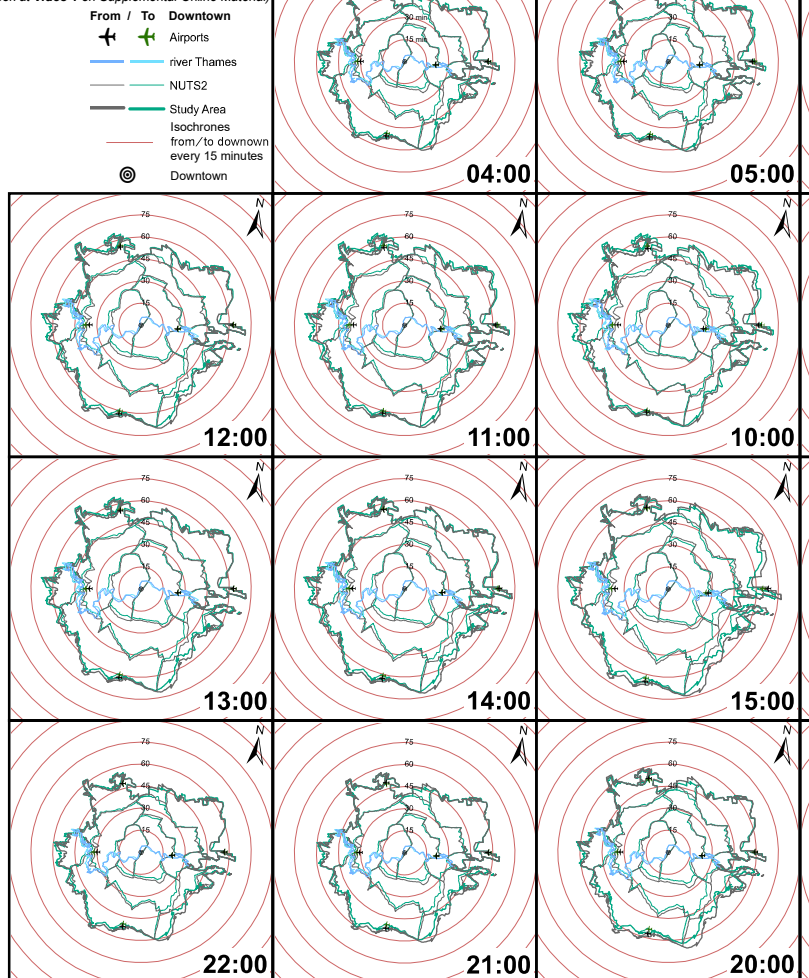
Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge funding from the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness as part of the SPILL-TRANS, (TRA2011-27095) project, the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and the European Regional Development Fund (ERDF) as part of DynAccess (TRA2015-65283-R) project, and the ICT Theme of the European Union's Seventh Framework Program as part of INSIGHT (GA 611307) project.



(A) Travel Time Cartograms from/to Downtown by Car**

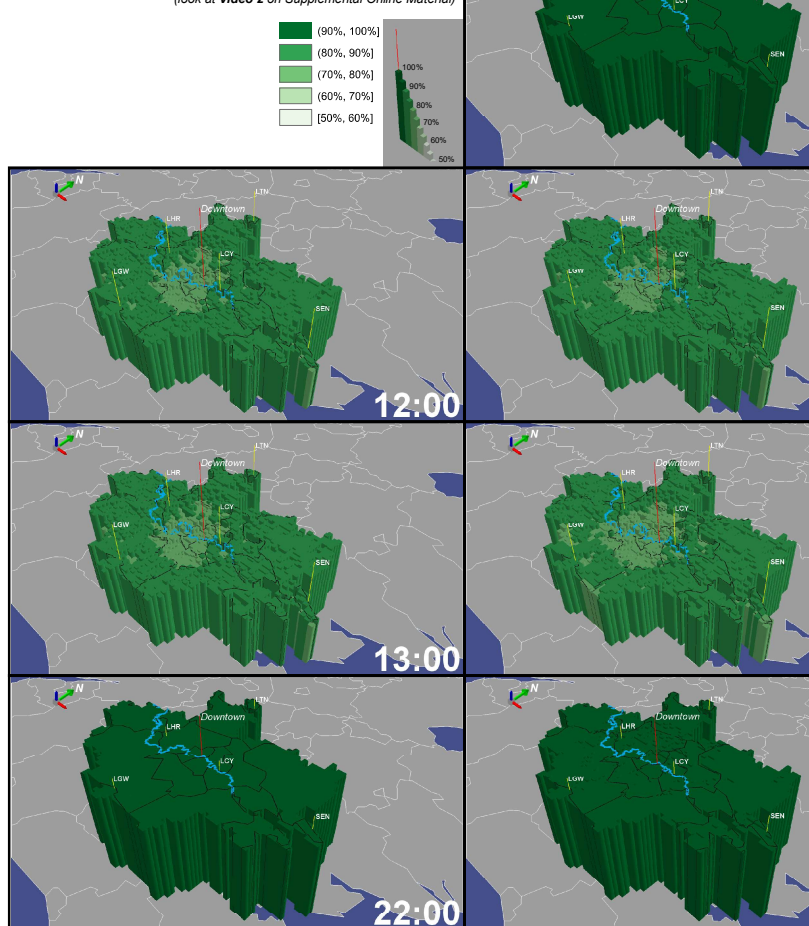
(look at Video 1 on Supplemental Online Material)

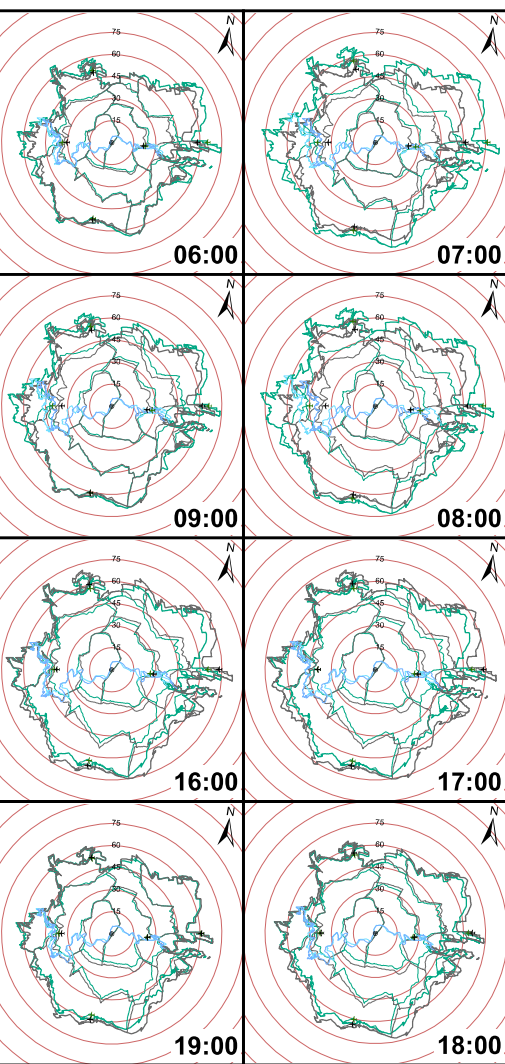


**For instance, it takes much longer to reach downtown from most study area borders than the other way around at 07:00

(D) Zonal Relative Potential Accessibility Changes

(look at Video 2 on Supplemental Online Material)

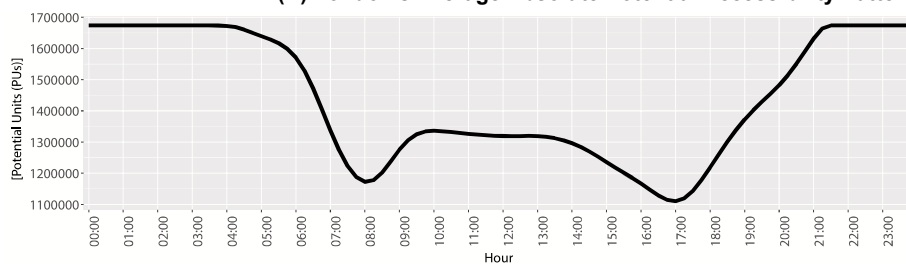




The Daily Dynamic Potential Accessibility by Car in London on Wednesdays

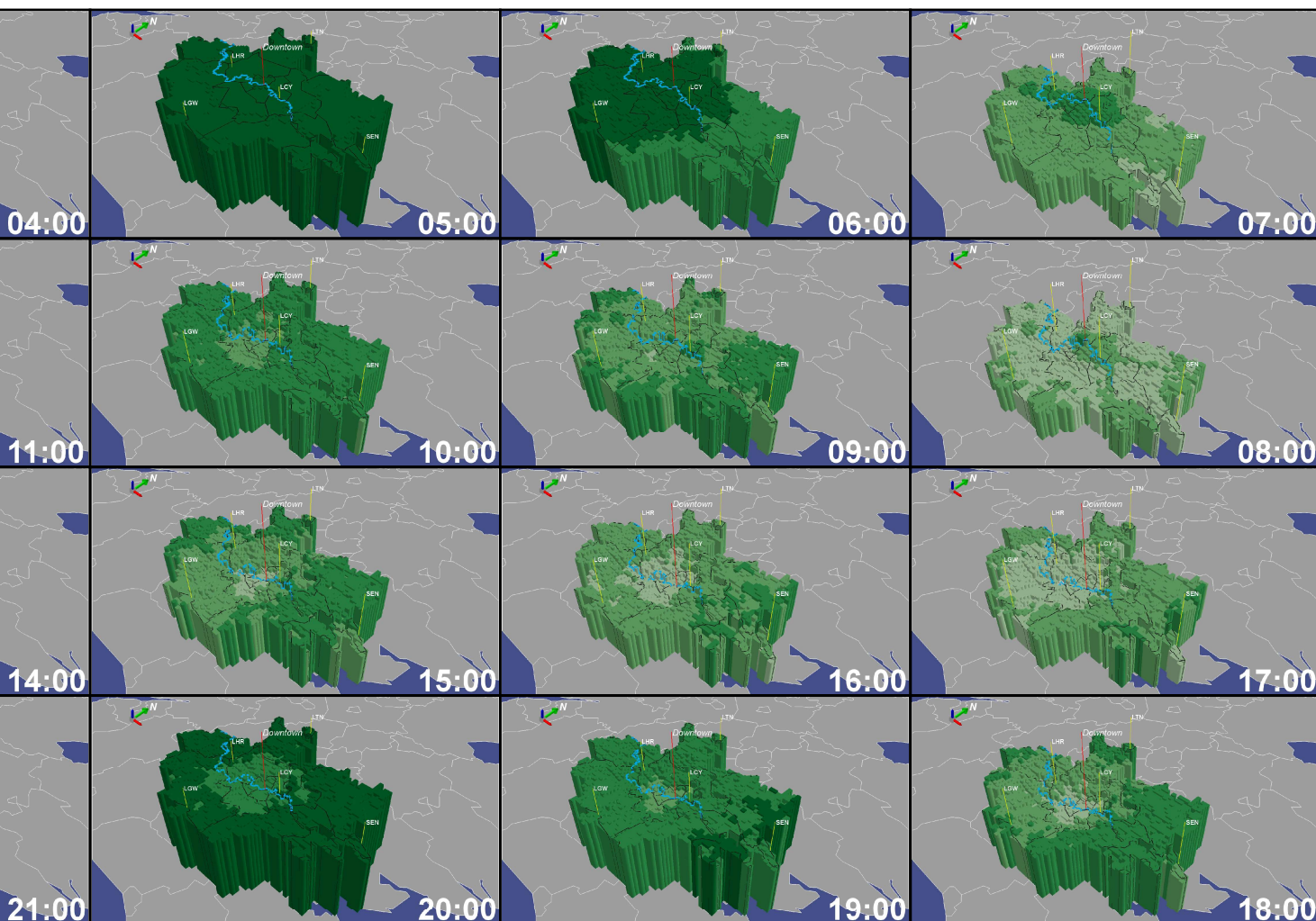
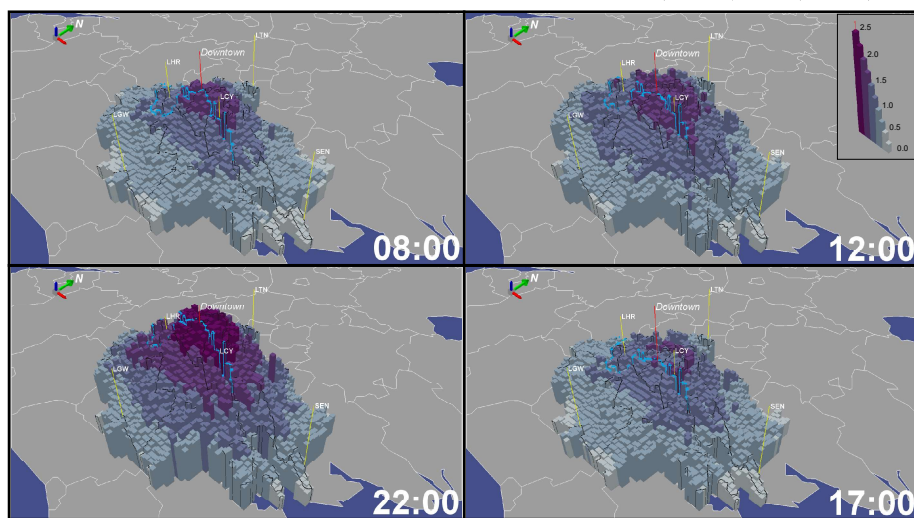
Moya-Gómez, Borja and García-Palomares, Juan Carlos
Transport, Infrastructure and Territory research group (tGIS) | Human Geography Department | Universidad Complutense de Madrid

(B) London's Average Absolute Potential Accessibility Pattern



(C) Zonal Absolute Potential Accessibility

[0.0, 0.5] [0.5, 1.0] [1.0, 1.5] [1.5, 2.0] [2.0, 2.5]



Paper 3: The impacts of congestion on automobile accessibility. What happens in large European cities?

Moya-Gómez, B. and García-Palomares, J.C. (2017). Journal of Transport Geography, 62, 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.05.014>

Abstract

Every day, a significant part of the population in large cities suffers transport congestion. One effect of this is a change in the spatial distribution of accessibility, which may lead to people or businesses finding themselves temporally in areas where accessibility values are lower than either desired or required. This paper studies changes in automobile accessibility over the course of the day, as caused by congestion of the road network in eight metropolitan areas of the European Union: London, Paris, Madrid, Berlin, Barcelona, Rome, Hamburg and Milan. The study was carried out using millions of data points on real speeds on segments of the road networks gathered over the course of two years from TomTom® devices, which provided for the incorporation of a dynamic perspective of accessibility. In each of the areas studied, the different impacts of congestion on automobile accessibility can be observed from differences in the distribution of opportunities and the provision of infrastructures, as well as from differences in culture and customs. Despite these differences, all cities experience two peaks with a lower value during the morning and afternoon. However, results show differences in the intensity and form of the effects of congestion on accessibility in these metropolitan areas. London, Paris and Rome are the cities where congestion has the greatest impact on automobile accessibility, while the Spanish cities are hardly affected by it.

Keywords: congestion; dynamic territorial automobile accessibility; European cities; global navigation satellite system data; GIS.

1. Introduction

Congestion is a problem of the land use/transport/society system. It is usually associated with large metropolitan areas, where the land is a very scarce and highly valuable resource, owing to the basis of their development: the high concentration of people, activities and services (Rode et al., 2014). Congestion seems to be inherent to agglomeration. Therefore, cities usually demand that the infrastructure networks, and their auxiliary venues, such as parking

lots, consume the minimum but necessary land, in order to allow them to function properly. A notable aspect of this trade-off in land-use distribution is the tolerance of congestion, since this may become a major obstacle for the development of cities. Some authors assert that the limits of a city or urban region are determined by congestion (Gospodini, 2002; Turok & Mykhnenko, 2007) as the benefits from the concentration of activities may not be sufficient to compensate for the congestion costs (Batty, 2008; Louf & Barthelemy, 2014).

In 2011, each automobile commuter in the major cities of the United States spent 38 hours and 19 gallons (~72 litres) of petrol as a result of congestion, a cost of \$818 per traveller for the year (Schrank et al., 2012). In the largest cities of the European Union (EU), time spent due to congestion over the year for standard 30-minute automobile journeys in 2012 ranged from the 59 hours, as observed in Madrid, to 97 hours in Paris and in Rome (TomTom, 2013b). In economic terms, the annual cost of congestion in the EU was estimated to be 1% of the GDP (Christidis & Ibáñez Rivas, 2012)⁷⁶. Congestion also has other negative externalities, such as increased levels of noise, pollution and the potential for accidents and lower life cycles for vehicles (OECD, 1999) and the capacity of the network to cope with incidents (its resiliency). Although congestion is associated with private transport, it could severely affect public road transport services and the social groups dependent on them, as well.

Since the temporal imbalance between demand and infrastructure capacity creates congestion (Ortúzar & Willumsen, 2011), many solutions have been based on increasing network capacity, e.g. new lanes or roads. This type of solution may perpetuate the problem, and even exacerbate or spread it, to other parts of the network and relationships: the “vicious cycle” of congestion (Handy, 1993). It could also create new problems, interfere with bus and pedestrian itineraries, or damage natural ecosystems (Litman, 2014). Congestion could trigger some sort of reaction in members of the system (M. N. Sweet, 2011): from changes in travel routes or schedules -short-term decision- to land use relocation to more resilient spaces -long-term decision (de Abreu e Silva & Goulias, 2009; D. M. Levinson & Kumar, 1994; M. N. Sweet, 2014). The conventional tools used to evaluate such solutions - that is, transport models - do not usually assess reactions, i.e. they omit the reaction and response times required by different members when faced with new situations (Gifford, 2003; Straatemeier, 2008).

It is essential to find land use and transport policies and suitable indicators that would be able to measure changes in the way the entire system functions and to make it more sustainable.

⁷⁶ All these values are based on free-flow speed, i.e. they are the upper congestion cost limit

But what are the policies that can achieve such objectives? How can their effects and results be measured? These questions are not to be taken lightly, as they may produce apparently good solutions that, in reality, have undesired effects (Levine & Garb, 2002).

Accessibility measurement could be a good tool to measure current and future situations. It is defined as “the extent to which the land use/transport system enables (groups of) individuals or goods to reach activities or destinations by means of a (combination of) transport(s) mode(s)” (Geurs & Van Wee, 2004, p. 128), “the ease with which activities can be reached, given a location, using a specific transport system” (Morris et al., 1979, p. 91), or the ease of interaction with a significant number of opportunities (Breheny, 1978; Bruinsma & Rietveld, 1998; Hansen, 1959). The interest of how transport networks and spatial interaction are related has grown exponentially, and accessibility analysis has played a central role in the agenda of regional and transport research for more than five decades (Reggiani & Martín, 2011). It has also gained ground on institutions that can most effectively wield it as a planning tool (Páez et al., 2012).

Accessibility is a dynamic attribute that changes over time due, for example, to changes in the transport network. Some of these bodies of research have begun using the opportunities offered by new data sources to dynamically analyse accessibility. The most-well known company is Google Maps and its data such as the General Transit Feed Specification (GTFS) for public transport (see Boisjoly and El-Geneidy, 2016; Farber et al., 2014), but that also provide information on the operation of company networks such as Inrix and TomTom. However, not much research has been performed with private transport networks. Previous car accessibility studies have shown the heterogeneous impact of congestion on the spatial distribution of accessibility (Bertolini et al., 2005; Lei & Church, 2010; Vandenbulcke et al., 2009). Out of these papers, of note are those carried out in Toronto by Sweet et al. (2015), using Inrix data. In turn, TomTom's® data were used by Owen et al. (2016) to compare the impact of congestion on accessibility during morning peak hours in the 50 main cities of the United States of America and Moya-Gómez and García-Palomares (2015) to create dynamic maps, showing the impact of congestion on daily accessibility in the metropolitan areas of Madrid and Barcelona. In none of these cases were the data used to compare cities internationally.

The objective of this article is to analyse the impact of congestion on automobile accessibility values in eight large metropolitan areas in the EU. This paper focuses on a part of the

accessibility measures: the effects of recurring congestion, i.e. that is produced despite the absence of incidents (Stopher, 2004). To this end, the TomTom® company's motorway network and its product Historical Speed Profiles® (TomTom, 2013a) was used.

This paper contributes to the literature on accessibility in several different ways. There is not much work that addresses a dynamic analysis of accessibility based on new data sources with global coverage. Here, the dynamic accessibility profile is obtained by calculating travel times for each link according to the time it is used for each route, and not the time when the trip starts ("fixed photo"). It is also possible to know with great accuracy, the temporal accessibility variations regarding the territory, and population. Moreover, the analysis is conducted for the eight large European metropolitan areas, which provides for drawing conclusions on the role of physical characteristics of urban areas (size, density distribution, infrastructure) or social characteristics related to "the use of time" (see HETUS database (Eurostat, 2009))

This paper also contributes to the perspective of land planning and management. The impact of congestion in accessibility conditions the competitiveness of cities and the quality of life of their inhabitants. Knowing each city's situation in comparison with others encourages the performance of certain actions. In turn, knowing the local impacts of congestion on accessibility distribution inside each city, identifying the temporal profile for each zone, facilitates joint planning for the transport system and distribution of land and equipment use, following Dutch ABC's philosophy (Martens & van Griethuysen, 1999). This provides for planning according to accessibility needs throughout the day, but also for attempting to improve daily accessibility in each area, according to use needs therein.

The paper tried to answer the following research issues: 1) Is it worth using new sources of transport network and the huge computing efforts in GIS dynamic analysis in order to improve measurement of the impact of congestion on urban accessibility? 2) What impact does congestion have on daily accessibility for large European cities? 3) How does congestion affect the internal accessibility distribution in large European metropolitan areas? 4) *How can the assessment of dynamic accessibility contribute to more efficient transport and land-use planning?*

The paper is structured as follows: Section 2 shows the methodology used in this paper. Section 3 explains the characteristics of the study areas and the details of the data of the network used. The results obtained are given in Section 4. The last section discusses conclusions and possible future research.

2. Methodology

Congestion is a dynamic phenomenon that requires dynamic data and appropriate methodologies to properly study it (Ben-Akiva, 1985). Accessibility changes over time, either due to changes in the transport network or due to variations in the attractiveness of destinations to carry out activities. One of the challenges in the accessibility study is how to improve the introduction of the spatial-temporal dimension, especially analysing daily changes (Geurs et al., 2015; Geurs & Van Wee, 2004; Van Wee, 2016). However, this issue has hardly been addressed up until now, due to the limitations of traditional data sources.

Previous studies on automobile accessibility and its variation were limited to using static scenarios (see (Tilahun, Yin, Li, & Keita, n.d.; Vandenbulcke et al., 2009)). This methodology is suitable for studies in which all properties of the network links can be considered constant throughout the duration of any trip. It tends to not adequately include the consequences of congestion or its temporal dimension: travel time depends not only on the origin, destination, transport mode and route chosen but on the moment each link of the network is used and its temporal impedance. With new data sources and by adapting traditional methodologies to dynamic reality, it is possible to overcome the conceptual limitations of using static scenarios. As opposed to previous analyses, which only address extreme situations in network operation (peak hour and off-peak hour), incorporating this dynamic perspective provides a view of the temporal change that takes place over the course of the day in infrastructure performance. This is a much more realistic and precise vision of each city's situation. Dynamic accessibility is important for activities and for the population, especially those who are less flexible regarding the consequences of congestion.

In this paper, we used a potential accessibility (Hansen, 1959) zone-based indicator to measure the direct effects of congestion on territorial automobile accessibility, with a negative exponential function: its main point of interest is the transformation of all opportunities into potential units, and it avoids the self-potential problem (Frost & Spence, 1995). The temporal congestion component was only incorporated in the indicator through dynamic estimation of the shortest travel time route, for each origin-destination relationship and the different instances of departure: Results show accessibility values at departure time. They also show when each zone is more affected by congestion, even some hours before this occurs. In this paper, opportunities remained constant. Equation A shows the definition of accessibility and the cost estimation used. Observe that the proposed measurement follows the Weibull's

axiomatic approach to accessibility measurement (Weibull, 1976).

$$A_i^t = \sum_{j \in N} D_j \cdot e^{\beta \cdot c_{ij}^t}; \forall i \in N, t \in T$$

subject to:

(A)

$$c_{ij}^t = \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} \alpha_{eij}^{tm} \cdot c_e^m; \forall ij \in G, t \in T$$

Where:

A_i^t is the potential accessibility value of origin i departing at t [Potential Units].

D_j is the opportunities of destination j . In this paper, we used the population distribution as an opportunities of destination variable.

$e^{\beta \cdot c_{ij}^t}$ is the impedance-decay function.

β is the parameter used. In our case⁷⁷, we used $\beta = -0.065$.

c_{ij}^t is the impedance experienced when travelling from origin i to destination j by the shortest route, departing at t . In this paper, the impedance is the travel time [min].

α_{eij}^{tm} is the binary variable that indicates whether network link e is used for the trip between origin i and destination j , when departure is at t , starting its use at instant m .

c_e^m is the expected impedance of network link e , the use of which begins at instant m . In this paper, the expected time is the travel time [min].

N represents all the zones included in the calculation area.

G is the set of origin-destination relationships, including relation with itself (origin i = destination j).

T is the set of instants of departures⁷⁸.

⁷⁷ The parameter was estimated with the 2001 census OD matrix and travel times for Madrid and Barcelona (INE, 2004). This value is constant for all the cities in order to compare them all under the same calculation conditions.

⁷⁸ For travel to work or education, it is important to reach the destination at a given time, not to start the journey at a particular time. However, calculating

M is the all possible instants within the study.

By applying Equation A to different departure instances, every 15 minutes in this paper, we obtain the data necessary to estimate the accessibility profiles. This makes it possible to estimate the daily variations in accessibility distribution in our study cases.

Finally, in order to understand each metropolitan area as a unit and carry out comparisons between them, we calculated the global accessibility profile, as expressed in the weighted average (Equation B):

$$A_{global}^t = \frac{\sum_{i \in N} A_i^t \cdot O_i}{\sum_{i \in N} O_i}; \forall t \in T \quad (B)$$

Where:

A_{global}^t is the global weighted accessibility value of the study area, when trips start at instant t .

A_i^t is the accessibility value of zone i when departure trip is t .

O_i is the weight or potential of origin i (in our case, population).

N is all the study zones.

T is all the instants of trips started.

After global analysis, we analysed the spatial distribution of the effects of congestion at local level in each metropolitan area. This was carried out in three steps:

- 1) By mapping, according to the zones of origin, the results of the maximum accessibility value (in free flow), the relationship between the accessibility value in free flow, and each worst accessibility values at morning and afternoon congestion peaks, and the moment of least accessibility in each zone were also identified.
- 2) Each zone is classified into the most similar general profile identified for each of the eight study areas. To do the assignation, we used the “kml” R-project package for longitudinal data fuzzy classification procedures.

times using the arrival time as a reference complicates the computation algorithm (programmed to work with travel departure times) and decisively increases calculation times.

- 3) Finally, we study the variation in distance accessibility to the city centre during both peaks.

The processes were carried out using ESRI® ArcGIS 10.1 for generating networks⁷⁹, calculating different impedance matrices with their algorithm in the heuristic version for dynamic FIFO networks (Chabini, 1998; Dean, 2004), including turn restrictions and directions in the network. We also used different ad-hoc Python scripts to mass process data on routes, and the R-project for different statistical studies.

3. The study areas. Eight European cities

In this paper, we studied the effects of congestion on automobile accessibility in eight of the most populated metropolitan areas in the EU: London (the United Kingdom), Paris (France), Madrid (Spain), Berlin (Germany), Barcelona (Spain), Rome (Italy), Hamburg (Germany) and Milan (Italy). Although each area shows different characteristics regarding infrastructure, distribution of opportunities, legislation, and the customs and habits of its residents, they are all typified by the existence of an unmistakable core city that brings the whole metropolitan space together. This does not mean that no other important cities are found within the metropolitan areas under study.

In this section and the next, we will use “accessibility” to refer to “automobile accessibility”. Any reference to trip or access should be interpreted as travelled/observed by car mode.

3.1. Study area delimitation

In this paper, each study area is taken to be all the LAU2⁸⁰ – 2011 version (Eurostat, 2011), also known as municipalities, that belong to the Functional Urban Area (FUA, (ESPON, 2014a)) of the main city or of any other FUAs completely surrounded by the main one, and that have more than 50% of their area within the density isoline of 500 inhabitants/km² of the main city. This isoline was generated with the *density kernel* tool⁸¹. Table 1 shows general information on each of the study areas, while Figure 1⁸² shows population distribution in 2011

⁷⁹ The free tool for ArcGIS StreetDataProcessingTools⁷⁹ was used to correctly create the Network Datasets with TomTom® data. Available for download at: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=755f96fcde454ece8f790fecb3e031c7>

⁸⁰ In the case of London, LAU1 were used.

⁸¹ Density kernel is a tool of ArcToolBox of ArcGIS; the search radius used to estimate the values was 10,000 metres.

⁸² The projection of all maps in this paper is the ETRS89 - Lambert Azimuthal Equal Area (LAEA) Europe (EPSG: 3025). All of them are on the same original scale (1:500,000 in DIN A4). We used some colour ramp from (Brewer & Harrower, 2013)

(Eurostat, 2016a).

City ⁸³	Code city	Country	Downtown	Num. LAU2	Population [inh]	Area [km ²]	Car share	Km Motorway	Km Motorway / 1,000 inh	Km Motorway / km ²
London	LON	UK	Charing Cross	70*	12,600,686	6,432	~40%	473.38	0.0376	0.0736
Paris	PAR	FR	Notre Dame	500	10,755,307	3,504	~35%	515.10	0.0479	0.1470
Madrid	MAD	ES	Puerta del Sol	39	5,838,470	1,960	~30%	655.73	0.1123	0.3346
Berlin	BER	DE	Alexanderplatz	27	3,831,475	1,840	~35%	181.08	0.0473	0.0984
Barcelona	BCN	ES	Plaça de Catalunya	88	4,402,333	1,420	~40%	303.14	0.0689	0.2135
Rome	ROM	IT	Piazza del Campidoglio	21	3,141,967	1,992	~60%	205.55	0.0654	0.1032
Hamburg	HAM	DE	Rathuis	41	2,259,357	1,504	ND	198.24	0.0877	0.1318
Milan	MIL	IT	Piazza del Duomo	339	4,928,373	2,824	ND	260.83	0.0529	0.0924
(*) LAU1										

Table 1. General information on the study areas. Car share data source (UN HABITAT, 2013). Motorway length is obtained from TomTom® data (see section 3.3).

The maps show the different urban morphologies. There is a marked tendency in Madrid and Barcelona towards a concentration of inhabitants in the main city, while Hamburg, Berlin and Rome have a more sprawled distribution. Paris, Milan and London are intermediate cases, ranging from a relatively compact city in the case of Paris, to more diffuse and extensive in the case of London. In all cases, there are major towns close to borders that are well-connected by car to the central city. These usually have similar distribution patterns to the main city. On the other hand, also observe the different motorway unitary provision. Madrid stands out with the greatest amount of motorway, both in km² and per inhabitant, while London has the least. Finally, Rome is the city with the greatest proportion of travel by car out of those studied. Figure 2 summarises these comments and shows how total population and net population density varies from each city centre.

3.2. The Origin/Destination zones data (O_i & D_i)

We divided each study area into a regular grid of 2x2 km cells based on the 1-km² EEA reference grid; they became the Origin/Destination zones. By using regular grid data from the same source it was possible to overcome some aspects of the Modifiable Areal Unity Problem (MAUP) (Kwan & Weber, 2008) and carry out comparisons of the study areas without previous treatments being required. On the other hand, we used some outside study area cells –which

⁸³ The cities are sorted by the most populated LUZ (ESPON, 2014a) to less one.

can be reached from the study area, at most, in 15 minutes at free flow speed travel times, to reduce border effects.

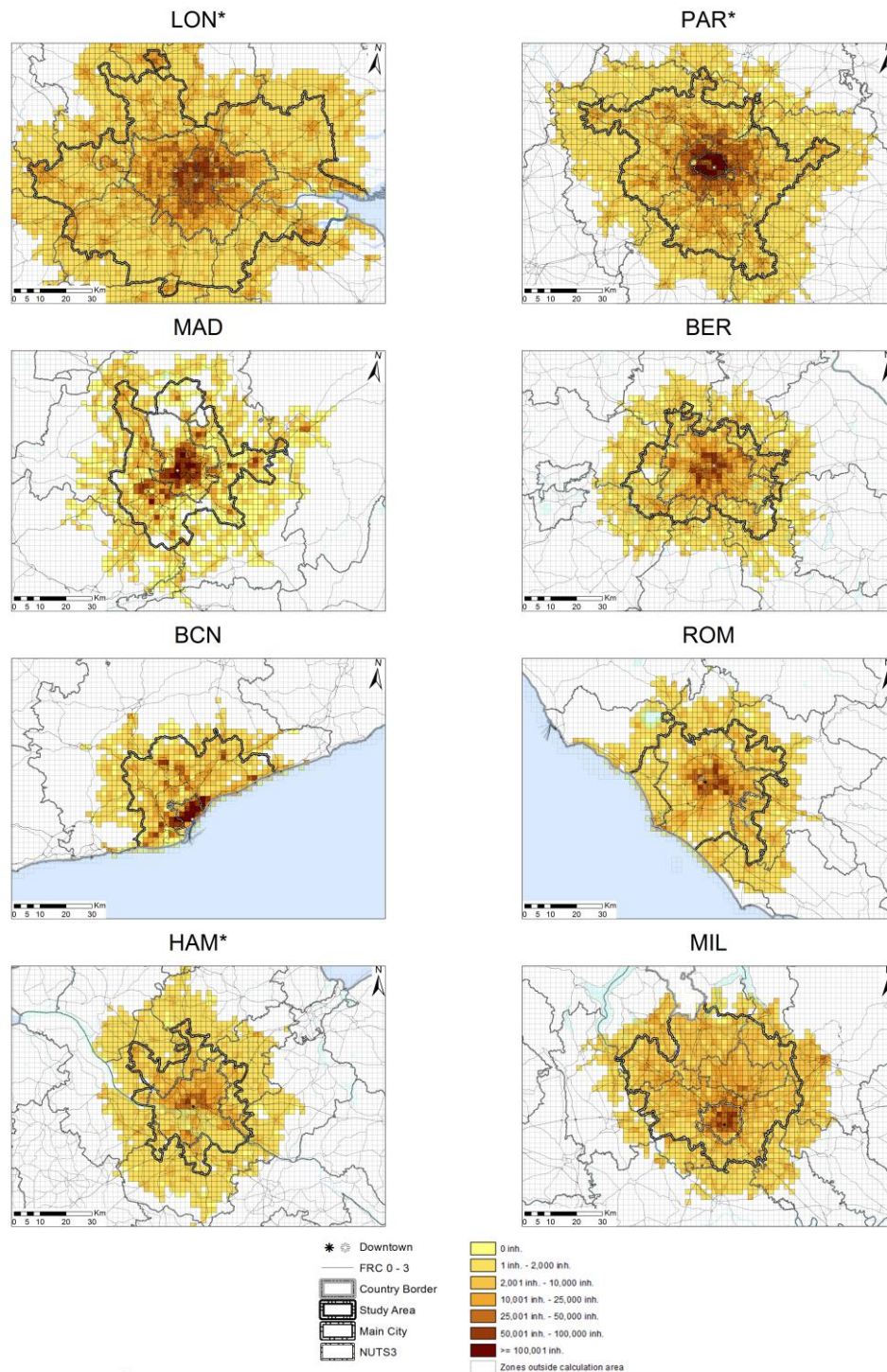


Figure 1. Spatial distribution of population in study areas and area of calculation (2x2km cells).

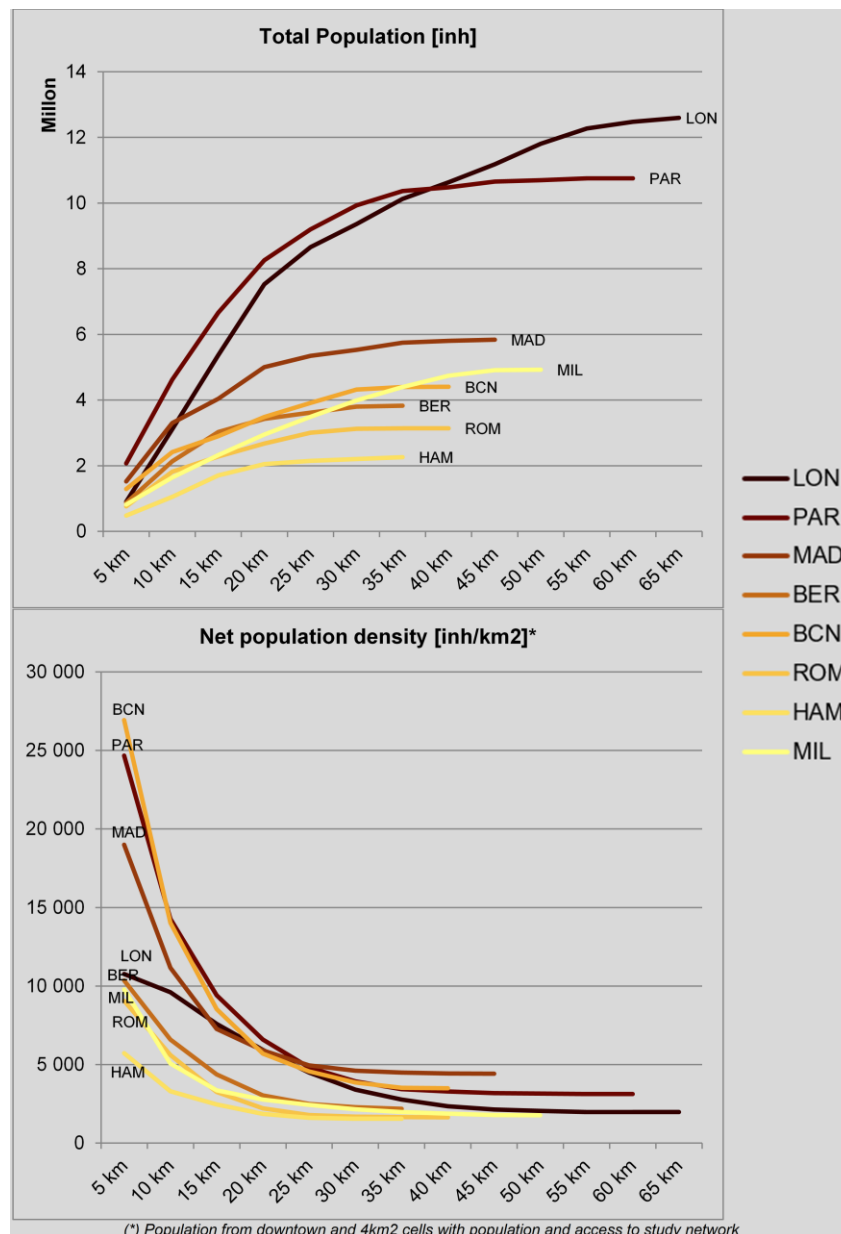


Figure 2. Accumulate population and net population density from each city centre.

The population in 2011 was used as a representative static value of the opportunities at each destination throughout the day. These values were also used for weighting global accessibility. Values of opportunities at destinations are constant in order to isolate the congestion effects on accessibility (Geurs & Ritsema van Eck, 2003)

We could not manage to find other homogenously-defined, trustworthy data for an entire set of study cities, or the data were population-based, such as (see Milego and Ramos, 2013). Nonetheless, we believe that population distribution is an acceptable approximation for the

type of analysis proposed here. Also, population accessibility in metropolitan areas could be useful to urban freight distribution – their vehicles represent 8-15% of total traffic flow in European metropolitan areas (European Commission, 2012), emergency services studies, or face-to-face interactions - some authors even argue that social interactions are the base of successful cities (see Sim et al., 2015), among other topics.

3.3. *TomTom®'s Speed Profiles. The data of network performance (c_e^m)*

In this paper, we use networks formed by links in categories 0 to 6 of the Functional Road Classification (FRC)⁸⁴ for TomTom® road networks (March 2013 version, data from 2011 and 2012). They incorporate all roads and the main urban network, and almost all the available information from TomTom®'s Speed Profiles data.

The Historical Speed Profile is made up of the average speed values observed every 5 minutes (TomTom, 2013a) over two years, as a percentage of the speed at each moment with reference to the observed free-flow speed (Figure 3). Each link was assigned one of the 98 predetermined profiles for each weekday. This data structure saves on memory and is devised to be suitably treated in an ESRI® ArcGIS environment (ESRI, 2014b).

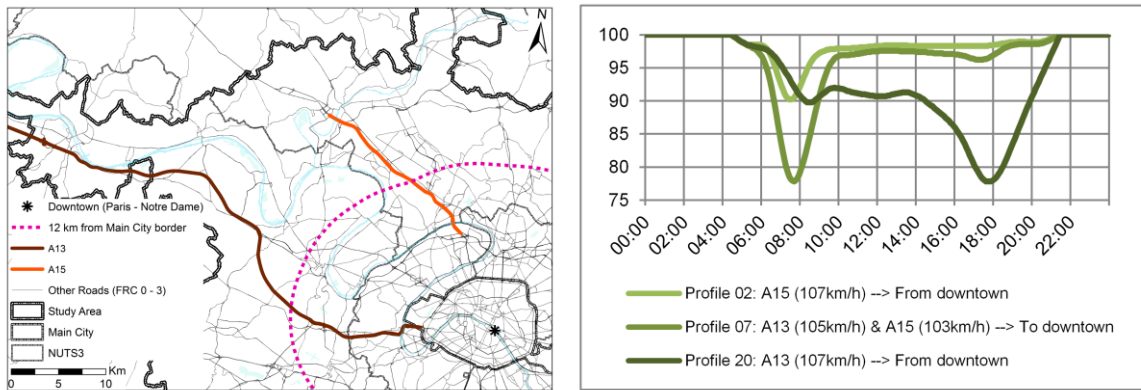


Figure 3. Some TomTom®'s Speed Profiles for Wednesdays in A13 and A15 at 12km from Main City border (Paris).

⁸⁴ TomTom®'s FRC Definitions. FRC 0: Motorway, Freeway, or Other Major Road; FRC 1: a Major Road Less Important than a Motorway; FRC 2: Other Major Road; FRC 3: Secondary Road; FRC 4: Local Connecting Road; FRC 5: Local Road of High Importance; FRC 6: Local Road; FRC 7: Local Road of Minor Importance; FRC 8: Other Roads.

4. What effect does congest have on the automobile accessibility of European cities?

This section shows the results of changes caused by congestion on the accessibility value in each of the study areas. These results show the effects of congestion on the territory over the course of the day of the study (Wednesday). The first part is a global examination of the results for each study area. The second section studies the spatial distributions of the impacts of congestion on each O/D zone. In the last section, the results are analysed, grouped according to their distance from the city centre. To facilitate comparisons between cities and zones within each city, the results are presented as relative values of changes in accessibility in regards to the observed situation in free-flow conditions (the upper accessibility value) in each one.

4.1. Results at a global level

In this section, each study area is considered as a single entity, with the aim of performing a comparison with few values. Tables 2 and 3, and Figure 5, show the results of value aggregation according to Equation B.

City	Morning peak	Afternoon peak	Avg. Free Flow Speed	Avg. Speed	Median Speed	Avg. Speed morning	Avg. Speed afternoon
London	08:00	17:00	64.93	61.18	60.47	55.26	54.99
Paris	08:00	17:15	62.11	56.95	55.58	49.18	48.86
Madrid	08:15	17:15	63.25	60.39	59.30	55.84	57.65
Berlin	08:00	16:45	67.37	61.79	60.51	56.06	55.05
Barcelona	08:15	17:15	64.27	60.71	59.34	55.48	57.11
Rome	08:15	17:15	62.59	57.57	55.84	50.38	50.92
Hamburg	08:00	17:00	67.34	61.69	59.97	55.27	54.71
Milan	08:00	17:15	65.50	60.56	58.71	53.47	54.52

Table 2. Main global speed [km/h] results.

Global accessibility in free flow is conditioned in the eight study areas by urban morphology and network characteristics. The greatest accessibility is seen in Paris and Madrid, ahead of London, despite this being the area of greatest population. The same situation can be observed between Milan and Barcelona, with greater accessibility in free flow in Barcelona, despite its lower amount of gross opportunities. The most extensive and disperse models in London (as opposed to Paris and Madrid) or Milan (as opposed to Barcelona), could explain these differences (see Figure 2).

City	Morning peak	Afternoon peak	Max. Glob. Access.	Avg. Globl. Access.	Median Global. Access.	Avg. Access. Morning	Avg. Access. Afternoon
London	08:00	17:00	1,814,921.12	1,560,434.44	1,469,948.84	1,272,647.35	1,204,878.75
Paris	08:00	17:15	2,473,804.15	2,161,772.19	2,051,117.28	1,772,452.22	1,689,596.50
Madrid	08:15	17:15	2,060,387.32	1,961,438.51	1,924,943.43	1,785,915.52	1,865,575.93
Berlin	08:00	16:45	1,152,014.94	1,041,000.01	1,017,988.49	923,028.45	898,370.95
Barcelona	08:15	17:15	1,484,358.61	1,395,325.05	1,362,372.38	1,250,964.93	1,303,252.86
Rome	08:15	17:15	1,019,456.70	896,599.39	848,297.13	748,862.39	740,802.08
Hamburg	08:00	17:00	771,653.93	697,676.61	676,678.81	608,464.27	600,591.78
Milan	08:00	17:15	1,262,852.58	1,129,991.01	1,082,648.21	930,978.18	959,818.34

Table 3. Main global accessibility [potential units] results.

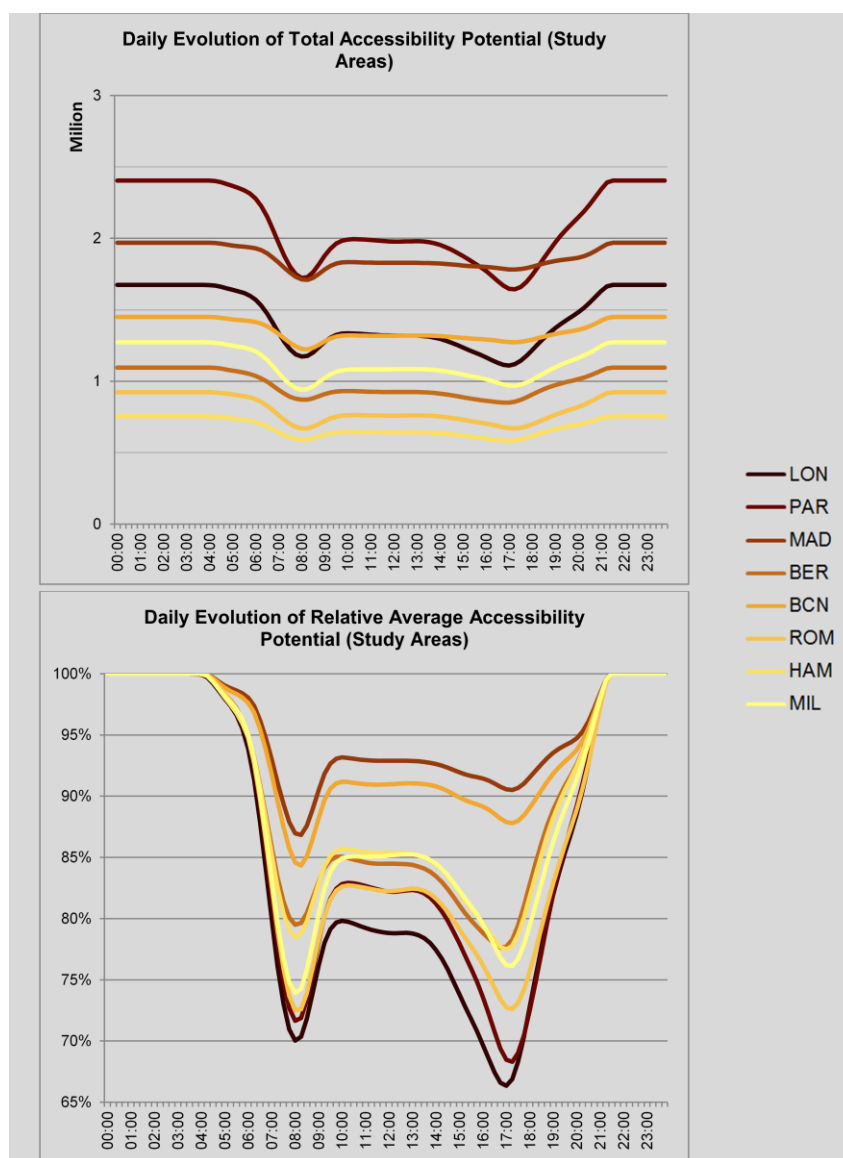


Figure 4. Daily evolution of average accessibility potential (in potential units and %).

While the greatest losses in average speed during peak hours are observed in Paris and Rome (Table 2), the differences in urban distribution differences mean that the effects of congestion are especially marked in the two large European metropolitan areas: London and Paris (Table 3 and Figure 4 top). If their situation is compared to those of the Spanish metropolitan areas (the least affected by congestion), we observe that London and Barcelona have almost the same accessibility value during the middle of the day, and Barcelona may reach an even greater number of opportunities than London during the times of greatest congestion. These results are of interest if we consider that Barcelona has a third of the population of London and a total area almost 5 times smaller, although the unitary amount of motorways of Barcelona is greater (Table 2). As a result of congestion in Paris, Madrid becomes the study area with the greatest weighted global accessibility during the afternoon congestion period. In the cases of Milan-Berlin and Rome-Hamburg, the Italian cities show greater weighted global accessibility values in free flow, yet their greater congestion, particularly during the morning peak, considerably reduces the differences with the German cities.

Figure 4 below shows the results as percentages out of the maximum value obtained (free flow), making it easier to observe the effects of congestion on accessibility. It confirms that the morning peak is more abrupt than the afternoon one since the former takes place over 4 hours while the latter lasts for 7.5 hours. There is a stationary period between the peaks, with values between 78% and 93% out of maximum accessibility. During the congestion peaks, accessibility may drop by about 15-30% in the mornings and 10-35% in the afternoon. The profiles of the Spanish study areas are much gentler than the others, with one marked congestion peak in the morning, but a much smaller one in the afternoon. The two German metropolitan areas show an intermediate situation, with some profiles having almost identical accessibility minimums and greater intensity of congestion in the afternoon. Milan shows a loss during the middle of the day similar to the German cities, but its congestion during the morning peak is much greater. Paris and Rome show a very similar accessibility profile, except that Paris loses almost 5% more accessibility than Rome during the afternoon peak. London is in the worst situation: Its accessibility is reduced by up to 30% during the morning peak, during the middle of the day it is always below 80% of its accessibility in free flow, and it shows a marked and extensive congestion peak in the afternoon (with losses of almost 35%).

4.2. Results at O/D zone level

This section introduces the spatial component of the impact of congestion on each study area (Table 4 and Figures 5a, 5b and 6). The situation in free flow shows an almost perfect concentric distribution in all the metropolitan areas analysed (the first row, Figures 5a and 5b). Only Barcelona and Roma show some clusters of their highest accessibility values in the peripheral zones, close to main roads accessing the city centre, or ring roads. As this concentric pattern is repeated in all the study areas, the differences between them are found in the rate of reduction in accessibility from the centre to the periphery. Paris and Barcelona show the most abrupt drops out of all the study areas. In contrast, Rome and Hamburg have a less marked decrease, with a greater number of zones concentrating their high accessibility values in free flow.

City	Accessibility of Max. value cell (MPUs)*	Cells with more acc. than 80% max value cell (%)	Cells worst case mornings (%)	Cells worst case mornings (%)
London	2,643,604.76	09.20	77.02	22.98
Paris	3,721,463.41	06.62	75.00	25.00
Madrid	2,700,058.41	16.53	89.80	10.20
Berlin	1,560,577.57	12.39	69.47	30.53
Barcelona	1,925,036.60	13.37	91.57	08.43
Rome	1,323,153.87	20.33	72.61	27.39
Hamburg	1,016,636.43	16.76	62.97	37.03
Milan	1,846,255.17	11.59	87.27	12.73

Table 4. Accessibility behaviour and values during free flow time and peaks. (* Use this value to read row 1 in Figures 5a and 5b).

Analysing the effects of congestion establishes a clear differentiation between peripheral zones, with worse accessibility values during the morning peak due to the flow towards the CBD and other points with a high concentration of activities for work or study purposes, and those centres. The centres and adjacent zones are mainly affected by congestion during the afternoon peak (return home). In Madrid and Hamburg, the centres are affected during both peaks and, although the moment of least accessibility also takes place in the afternoon (see rows 1 and 3 in Figure 6); the normalized relative difference⁸⁵, as opposed to the lowest

⁸⁵ We used the following equation: $\%value = \frac{best_peak - worst_peak}{1 - worst_peak}$

morning value, is very small (see fourth row in Figures 5a and 5b), Notice that a large part of German cities' zones have a small differences between the worst values. This behaviour is

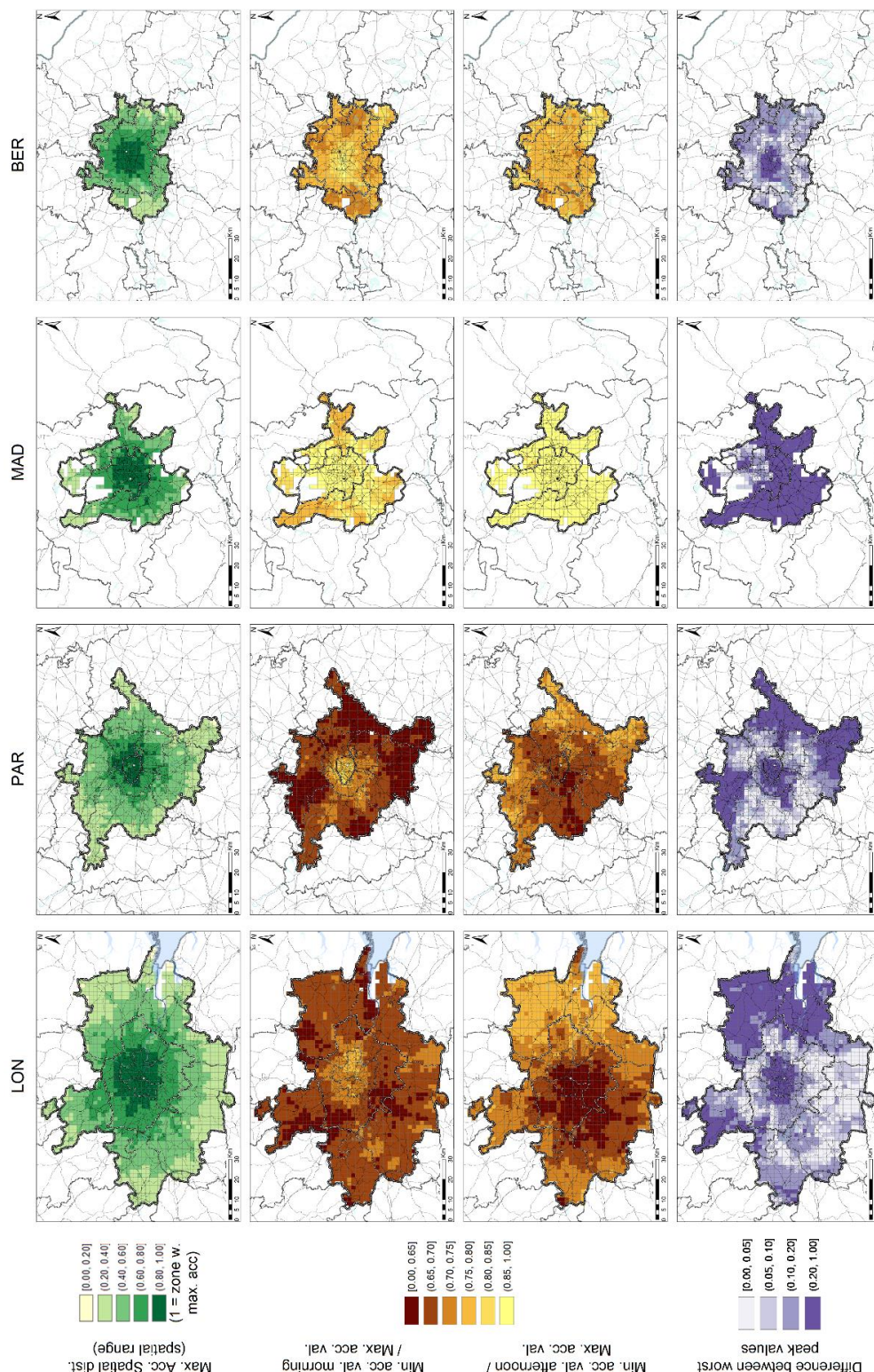


Figure 5a. Accessibility during Wednesdays in London, Paris, Madrid and Berlin.

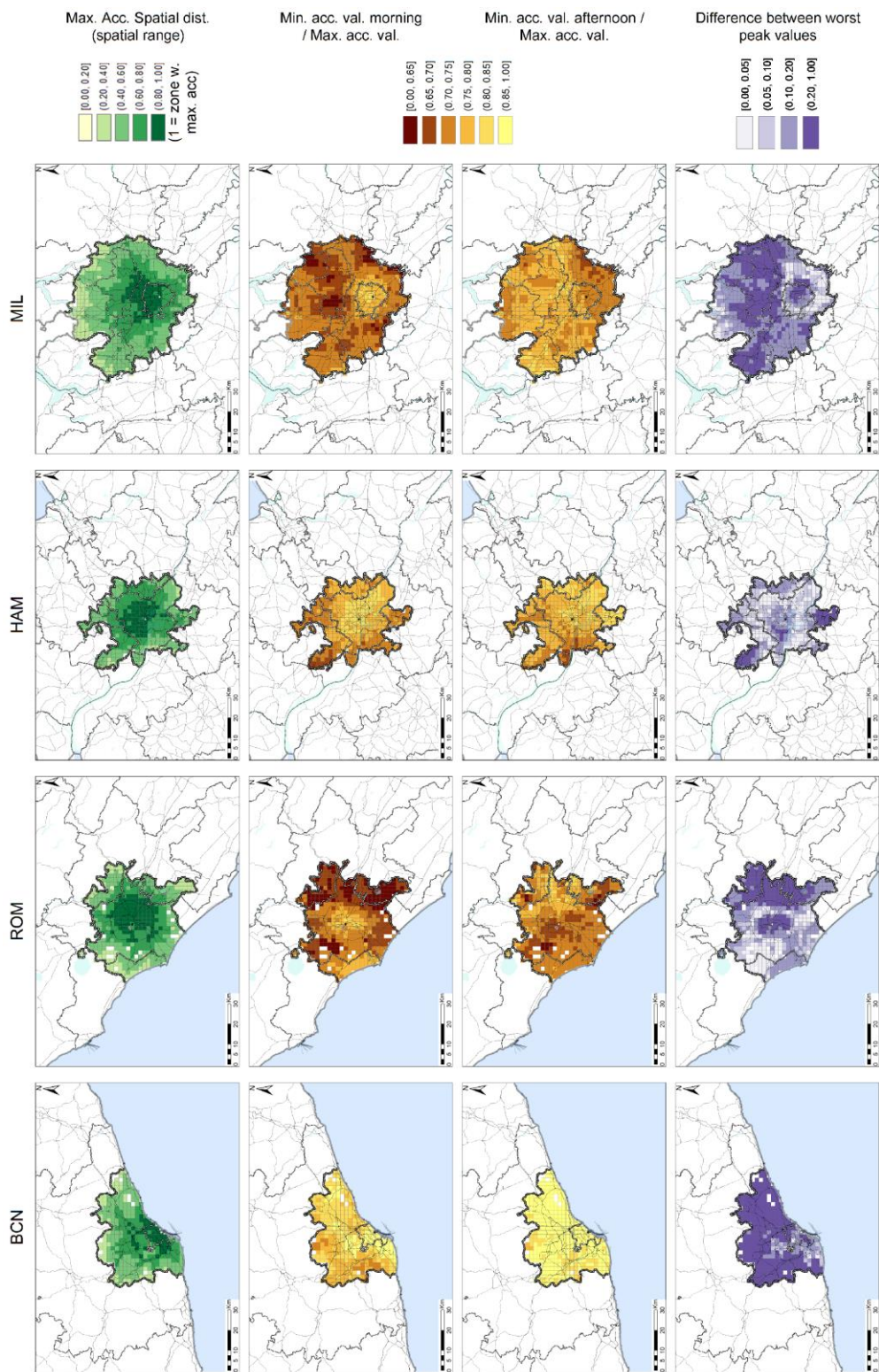


Figure 5b. Accessibility during Wednesdays in Barcelona, Rome, Hamburg and Milan.

also observed in areas surrounding the centres of the other study areas. In general, the effects of congestion spread in waves from the outside to the inside of the study areas during the morning congestion period. In the afternoon, it is only in London, Madrid, Barcelona and Rome where the effects are seen in the opposite direction from one or more centres (like London and Rome).

Figure 6 (first and third row) shows the hours of poorest accessibility in each of the zones. There is a marked difference between the zones affected by morning congestion (fundamentally the periphery) and the zones with the greatest loss of accessibility in the afternoons (urban centres and areas of activity). If the metropolitan areas are compared, cities like London, Paris, Berlin, Rome or Hamburg have a considerably greater number of zones that are more affected by afternoon congestion, with a slightly more delayed peak in Paris and Rome (17:15-17:30) than in London or Hamburg (17:00). In the Mediterranean metropolitan areas (especially the Spanish ones), however, the afternoon peak is clearly limited to urban centres and certain specific zones or corridors of activity.

Finally, to summarise the information on local distributions of the impacts of congestion, each one of the zones has been classified (labelled) according to their daily accessibility profile. The eight global profiles of the analysed cities were taken as a reference (Figure 4 below). Each zone is assigned to the profile to which it has the greatest probability of resembling, as long as this probability is greater than 40% and the result of the division with the second most-probably profile probability is more than 1.25. Using global profiles of cities, as previously described in detail (see section 4.1), may facilitate interpretation of the results. This strategy to reduce dimensionality is similar to the one used by TomTom® to distribute its historical speed data (see section 3.3.). This classification is a useful tool for planning transport and land use, given that it provides for identification of each zone's daily behaviour in a simple way (profile type, the severity of the congestion's effects and trends at all times, etc.). 90% of the zones have an assigned profile. Most of the zones are classified with city patterns from the same country. Notwithstanding, for example, in the peripheries of Paris and London, we find some zones with profiles similar to Italian cities; in other words, a better situation throughout the day than those classified as similar to their metropolitan area. Except for some areas in central Rome, the profiles with the greatest impact (London and Paris) are only seen in their respective cities.

Comparative studies between zones in each of the study areas are of great interest because differences between zones might trigger some decision processes, such as the location of new

activities or residential areas depending on accessibility needs, or rescheduling and/or relocating activities. The most notable differences appear between the more peripheral zones of each study city and central spaces. But “islands” of groupings of zones with losses in accessibility greater than those seen in adjacent zones are observed in all cities. A good example of differences between intra-metropolitan zones is seen in the zones of high population concentration around the two Paris corridors: The A-13 (the western corridor from the centre) and the A-15 (the north-western corridor from the centre) (See Figure 3). Both zones have similar accessibility values under free flow traffic flow condition. The zones along the A-13 corridor show two peaks with congestion having a higher impact on accessibility, with zones classified as Paris-type zones (see Figure 4 below to see the shape of the profile in this zone), which indicates severe accessibility losses during the middle hours of the day. On the other hand, the A-15 corridor has a different behaviour. While its losses are greater in the morning, its accessibility losses in the afternoon are lesser. This corridor has Paris-type zones, other Milan-type zones, but most of them could not be classified given that their behaviour is a blend of the aforementioned. In summary, the greatest losses in accessibility in the A-13 corridor most certainly affect access to opportunities and services for the population and companies located in its surroundings. On the other hand, the lesser impact of congestion makes it more attractive, from an accessibility perspective, for new residential areas and activities located in the A-15 corridor, as long as their activity does not depend on accessibility during morning rush hour, given that at this time, the accessibility losses are greater than the A-13 corridor's.

4.3. Aggregate results according to distances from the centre

Finally, a study was performed on the worst accessibility in each area during congestion peaks in the morning and the afternoon, based on their distance to the city centre, as shown in Figure 7.

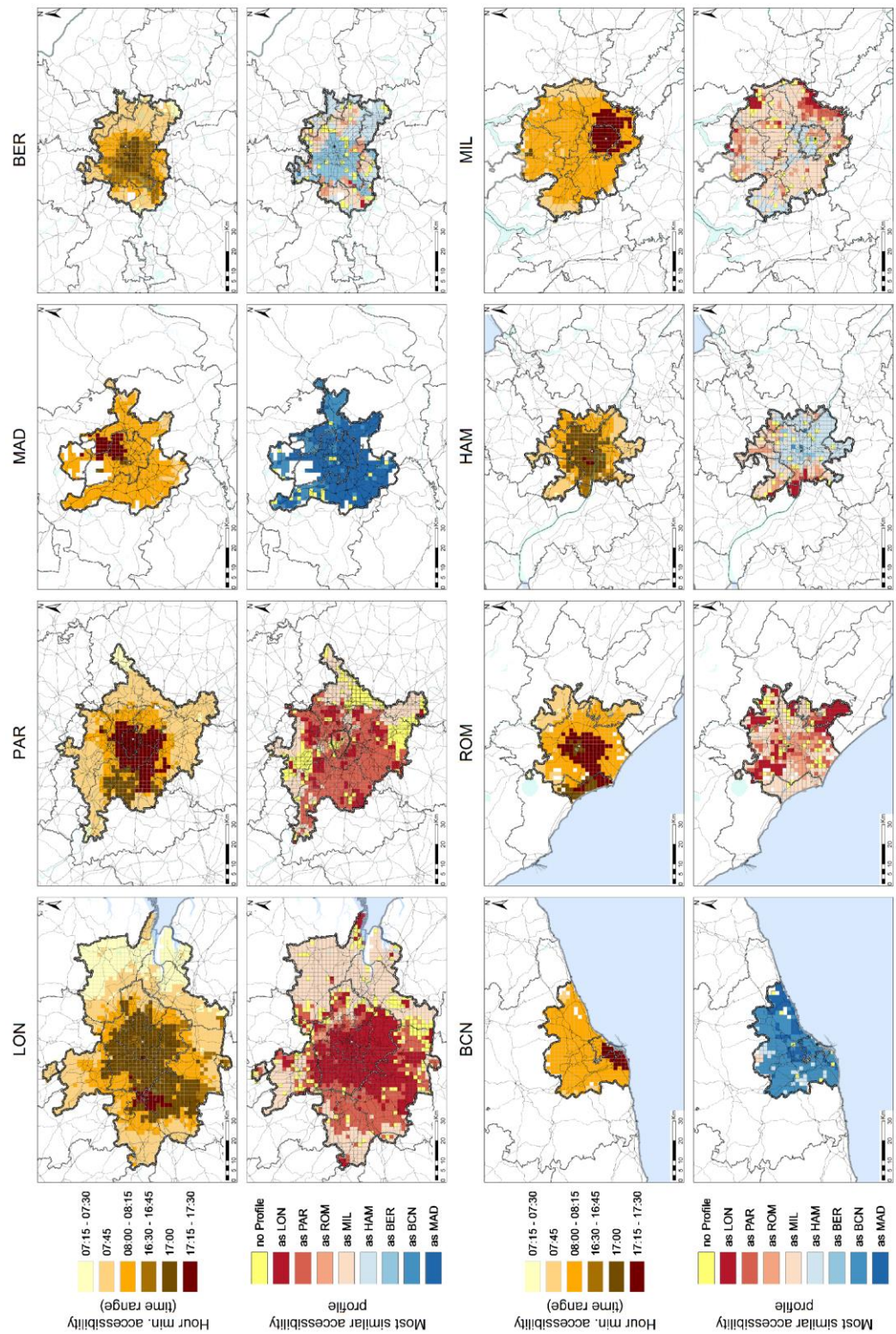


Figure 6. The worst hour and classification of each zone according to the similarity of their relative profiles to the global cities' relative profiles (Figure 4).

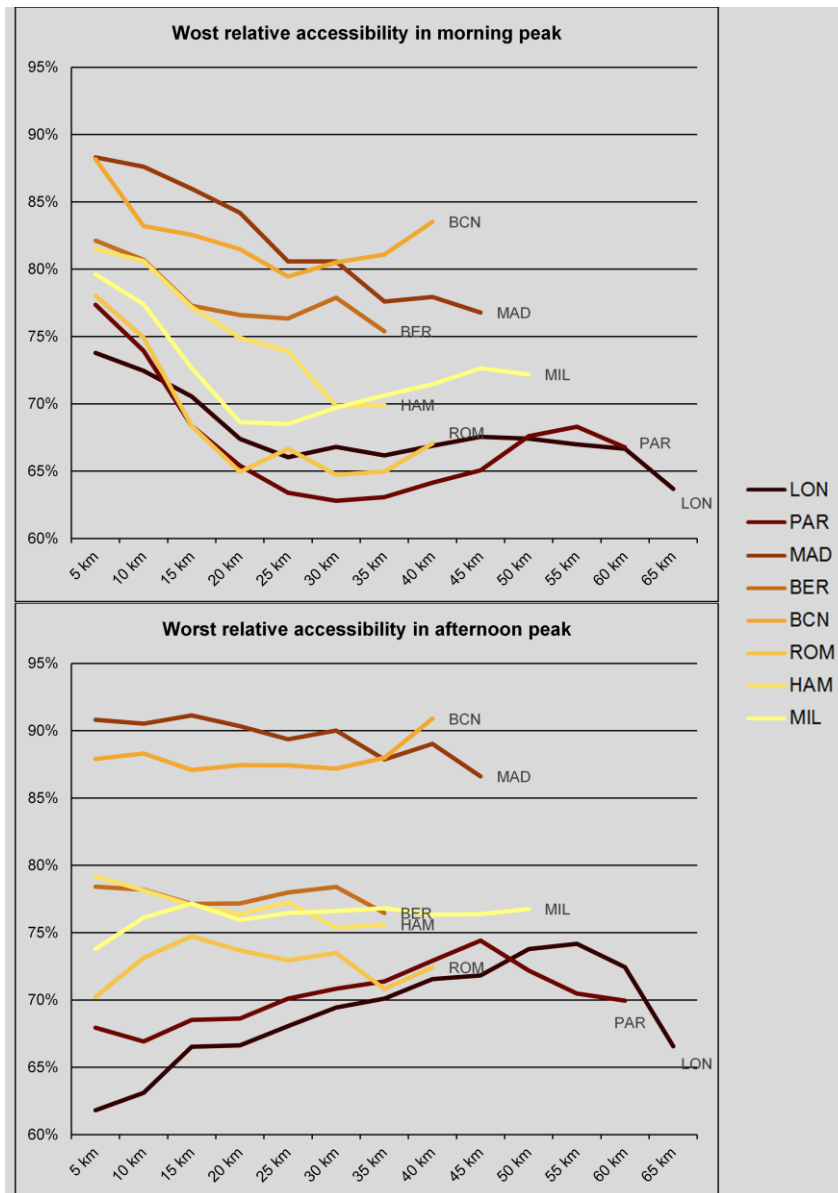


Figure 7. Worst accessibility peak from downtown.

During the morning peak, the central and adjoining zones in large cities have the least accessibility losses, given that their exits are not very affected by congestion. On the other hand, the worst relative values are not found in the most remote areas, but in those located between 20 and 40 km away, U-shaped graphically. Madrid, Berlin and Hamburg are exceptions, although Berlin does have this shape. The influence of the densest and most congested spaces in urban centres has a radius of influence of up to 40 km, which suffer more from congestion in access to the centre. However, beyond these distances, dependency on the centre is reduced, along with the effect on congestion. This is indicative that accessibility

in the borders defined does not depend so much on the relations going through the most congested areas. This situation is more evident in larger and more congested metropolitan areas (such as Paris and London), while it is less so in more concentrated areas (like Madrid) (see Figures 1 and 2). During the afternoon peak, relative accessibility tends to act as a line that grows, starting at the centre, for all cities, until it reaches between 30 km and the border, where the values decrease. This phenomenon may indicate intermediate, high-impact concentrations in the most peripheral zones, congested by general traffic movement. The only noteworthy exceptions are Barcelona, whose accessibility is much greater in peripheral zones, and Hamburg, whose city centre is less affected by afternoon congestion.

5. Conclusions

Typical congestion research measures its costs in terms of “extra” time spent commuting, or relative increases in commute times compared to free-flow travel. These approaches implicitly focus on the experience of individual travellers. Rather than focusing on the experiences of individual travellers, the approach using accessibility measures seeks to quantify the overall impact that congestion has on the potential for interaction within urban areas.

The application of temporal variability of accessibility level is a ‘hot topic’ in accessibility studies. In this paper, we used TomTom® data, one of the recently emerging data source, to perform a temporal analysis to identify the impact of congestion on the daily accessibility profile of large European cities. Results show that dynamic analysis of accessibility substantially improves the measurement of the impact of urban congestion, providing for identification of the global profile of daily accessibility for each city and by seeing how congestion affects internal accessibility distribution in each one of the large European metropolitan areas. It is clear that the results may contribute to more efficient planning of the transport system and land use, identifying the most affected spaces and facilitating an equipment and land-use positioning policy according to each one of their daily accessibility needs. Besides, these results allowed us to address the research questions:

- *Is it worth using new sources of transport network and the huge computing efforts in GIS dynamic analysis in order to improve measurement of the impact of congestion on urban accessibility?* To carry this out in this paper, the definition of potential accessibility was used to obtain a daily accessibility value every 15 minutes for each O/D zone, in order to generate the respective accessibility profiles. Unlike previous

papers, a dynamic perspective of accessibility was carried out, which means considering not only the departure time but also the exact moment each network link is used (and consequently the speed along it taking congestion into account). Although this type of study requires greater computational effort, both for carrying out calculations for departure times and repeating each operation throughout the study period, the results obtained from it give a clearer and more realistic idea of the impacts of congestion on accessibility, including temporal evolution and time characteristics which are not revealed by static studies.

- *What impact does congestion have on daily accessibility for large European cities?*

The results obtained show how accessibility drops more than 30% out of the free-flow situation, in cities such as London and Paris, but can also reach average loss during central hours of the day at 15-20%. On the other hand, the two large Spanish cities have much less dramatic impacts, both during peak hours and during central hours of the day. The German cities and the two Italian cities considered are in an intermediate situation. Italy performs worse. These differences in Europe also take place with North American cities, where most large cities have reductions in accessibility greater than 20-25% during peak hours (for example, New York, Boston, Chicago, Houston and Seattle), with impacts over 30% in cases such as Los Angeles (Owen et al., 2016). Larger cities typically experience greater congestion than smaller cities. However, road network structure, traffic management practises and the provision of other transport modes means that individual cities experience greater or lesser congestion impacts than their size might predict.

- *How does congestion affect the internal accessibility distribution in large European metropolitan areas?*

Congestion most notably affects accessibility distribution inside each city. The changes affect a general spatial pattern of accessibility values. During the morning peak, the greatest losses are observed in the peripheries, severely affecting zones up to 40km from the centre. However, during midday and afternoon hours, urban centres have the highest concentration of losses. This is because, at this time, congestion usually appears in outward traffic flows.

The results also show how the zones that the different zones with each city usually behave in a similar way as a whole, so the profiles that dominate the interior of each city match the city's general profile (dominating own profiles), although there may be large differences in the distribution of opportunities and/or infrastructure performance. Consequently, it appears that, along with the size and shape of the city, cultural aspects

and labour legislation also play a crucial role in congestion management policies and their effects on automobile accessibility. Similarities between city profiles in the same country would appear to corroborate this statement. As such, for example, in Madrid or Barcelona, where workdays have a fairly concentrated start time, but a more flexible departure time, congestion effects disappears in the afternoon. For the two Italian cities, characterized by a car-focused culture, the impact of congestion is greater than with German cities, or when performing other activities such as leisure activity (for example, the differences between Mediterranean countries and those in Central or Northern Europe).—Notwithstanding, this statement cannot be contrasted with the analyses performed in this paper, so it is merely presented as a hypothesis to be contrasted in future research.

- *How can the assessment of dynamic accessibility contribute to more efficient transport and land-use planning?* It is essential to be aware of the spaces and day times most affected by a loss in accessibility is fundamental in order to suggest actions in transport networks/services oriented toward ensuring acceptable accessibility values, and to propose locations and relocations towards more efficient land use. This combination of policies for the planning of transport systems, including public transport, and land use, is essential to mitigate the effects of congestion on accessibility and to make metropolitan spaces more resilient to it. The assessment of the variations in daily automobile accessibility aids in updating the combined policies on the whole transport system and land use, and also introduce the temporal component. As such, it is possible to locate activities in the places that are most suited to their needs for accessibility, according to the different time bands in which the activities are carried out. Certain activities in places with high accessibility values in free flow can suffer unacceptable losses when there is congestion. A good example is access to emergency medical care, which is usually by road. The location of ambulance stations must guarantee a minimum degree of resiliency in situations of congestion to protect the quality of the service in all time bands.

However, one of the limitations of this paper is that the use of population as fixed opportunities values, especially in urban studies, could not account for whole system complexity and the derived behaviour. We should also consider other accessibility values, such as job, educational, medical or shopping values, and use other data like opportunities time variation, e.g. opening times or real time-based people distribution (Y. Chen et al., 2011), other transport modes, e.g. public transport (Owen & Levinson, 2014), and individual abilities or

characteristics, in addition to others. As a result, society as a whole could better identify current problems, define a reasonable target and find adequate solutions – which also means minimising possible side effects (see (Bonsall & Kelly, 2005; Levine & Garb, 2002)) -.

Finally, it is worth mentioning that the dynamism of congestion is a difficult problem to explain with static maps and graphs. This paper has explored different ways for showing the most significant results to understand the causes and consequences of this phenomenon. Even so, these representations could lead to a great loss of information of interest. This is not a trivial matter, since the unequivocal simplicity and meaning of the measurements, formally known as soundness and plainness, must also be guaranteed in order to convert the results into useful tools for policy makers.

Acknowledgements

The authors would like to thank for funding this research the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness as part of the SPILLTRANS, (TRA2011-27095) project, the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and the European Regional Development Fund (ERDF) as part of DynAccess (TRA2015-65283-R) project, and the ICT Theme of the European Union's Seventh Framework Program as part of INSIGHT (GA 611307) project. We are also very grateful to the peer reviewers. Their comments were most welcome, and they improved the clearness and usefulness of this paper.

Bibliography

Batty, M. (2008). The size, scale, and shape of cities. *Science*, 319(5864), 769–771. <http://doi.org/10.1126/science.1151419>

Ben-Akiva, M. E. (1985). Dynamic network equilibrium research. *Transportation Research Part A: General*, 19(5–6), 429–431. [http://doi.org/10.1016/0191-2607\(85\)90042-1](http://doi.org/10.1016/0191-2607(85)90042-1)

Bertolini, L., le Clercq, F., & Kapoen, L. (2005). Sustainable accessibility: A conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport Policy*, 12(3), 207–220. <http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.006>

Boisjoly, G., & El-Geneidy, A. (2016). Daily fluctuations in transit and job availability: A

comparative assessment of time-sensitive accessibility measures. *Journal of Transport Geography*, 52, 73–81. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.03.004>

Bonsall, P., & Kelly, C. (2005). Road user charging and social exclusion: The impact of congestion charges on at-risk groups. *Transport Policy*, 12(5), 406–418. <http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.06.007>

Breheny, M. J. (1978). The measurement of spatial opportunity in strategic planning. *Regional Studies*, 12(4), 463–479. <http://doi.org/10.1080/09595237800185401>

Brewer, C. A., & Harrower, M. (2013). ColorBrewer2. Retrieved August 8, 2014, from <http://colorbrewer2.org/>

Bruinsma, F. R., & Rietveld, P. (1998). The accessibility of European cities: theoretical framework and comparison of approaches. *Environment and Planning A*, 30(3), 499–521. <http://doi.org/10.1068/a300499>

Chabini, I. (1998). Discrete Dynamic Shortest Path Problems in Transportation Applications: Complexity and Algorithms with Optimal Run Time. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1645(1), 170–175. <http://doi.org/10.3141/1645-21>

Chen, Y., Ravulaparthi, S., Deutsch, K., Dalal, P., Yoon, S., Lei, T., ... Hu, H.-H. (2011). Development of Indicators of Opportunity-Based Accessibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2255(2), 58–68. <http://doi.org/10.3141/2255-07>

Christidis, P., & Ibáñez Rivas, J. N. (2012). Measuring road congestion. Luxembourg (Luxembourg): European Commission. <http://doi.org/10.2791/15282>

de Abreu e Silva, J., & Goulias, K. G. (2009). Structural Equations Model of Land Use Patterns, Location Choice, and Travel Behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2135, 106–113. <http://doi.org/10.3141/2135-13>

Dean, B. (2004). Shortest paths in FIFO time-dependent networks: Theory and algorithms. Rapport technique, Massachusetts Institute of Technology. Boston. Retrieved from <http://people.csail.mit.edu/bdean/tdsp.pdf>

ESPON. (2014). ESPON 2013 Database Dictionary of Spatial Unites. Retrieved January 20, 2014, from http://database.espon.eu/db2/jsf/DicoSpatialUnits/DicoSpatialUnits_onehtml/index.html

ESRI. (2014). Historical traffic. Retrieved January 27, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//0047000001rs000000>

European Commission. (2012). Study on Urban Freight Transport. Brussels (Belgium). Retrieved from <http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/studies/doc/2012-04-urban-freight-transport.pdf>

Eurostat. (2009). Harmonised European time use surveys. Retrieved January 25, 2017, from <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/KS-RA-08-014>

Eurostat. (2011). Local Administrative Units (LAU). Retrieved January 20, 2014, from http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/nuts_nomenclature/local_administrative_units

Eurostat. (2016). GEOSTAT. Population Distribution Demography 2011. Retrieved September 25, 2016, from <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/population-distribution-demography/geostat>

Farber, S., Morang, M. Z., & Widener, M. J. (2014). Temporal variability in transit-based accessibility to supermarkets. *Applied Geography*, 53, 149–159. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.012>

Frost, M. E., & Spence, N. A. (1995). The rediscovery of accessibility and economic potential: the critical issue of self-potential. *Environment and Planning A*, 27(11), 1833–1848. <http://doi.org/10.1068/a271833>

Geurs, K. T., De Montis, A., & Reggiani, A. (2015). Recent advances and applications in accessibility modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, 82–85. <http://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.09.003>

Geurs, K. T., & Ritsema van Eck, J. (2003). Evaluation of accessibility impacts of land-use scenarios: the implications of job competition, land-use, and infrastructure developments for the Netherlands. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(1), 69–87.

<http://doi.org/10.1068/b12940>

Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>

Gifford, J. L. (2003). *Flexible Urban Transportation*. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Science Ltd. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=660405>

Gospodini, A. (2002). European cities in competition and the new “uses” of urban design. *Journal of Urban Design*, 7(1), 59–73. <http://doi.org/10.1080/13574800220129231>

Handy, S. (1993). A cycle of dependence: Automobiles, accessibility, and the evolution of the transportation and retail hierarchies. *Berkeley Planning Journal*, 8, 21–43. Retrieved from <http://www.uctc.net/research/papers/233.pdf>

Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76. <http://doi.org/10.1080/01944365908978307>

INE. (2004). Population and Housing Census 2001. Retrieved December 10, 2013, from http://www.ine.es/en/censo2001/index_en.html

Kwan, M.-P., & Weber, J. (2008). Scale and accessibility: Implications for the analysis of land use–travel interaction. *Applied Geography*, 28(2), 110–123. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.002>

Lei, T. L., & Church, R. L. (2010). Mapping transit-based access: Integrating GIS, routes and schedules. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2), 283–304. <http://doi.org/10.1080/13658810902835404>

Levine, J., & Garb, Y. (2002). Congestion pricing's conditional promise: Promotion of accessibility or mobility? *Transport Policy*, 9(3), 179–188. [http://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00007-0](http://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00007-0)

Levinson, D. M., & Kumar, A. (1994). The rational locator: Why travel times have remained stable? *Journal of the American Planning Association*, 60(3), 319–332. <http://doi.org/10.1080/01944369408975590>

Litman, T. (2014). Smart congestion relief: comprehensive analysis of traffic congestion costs and congestion reduction benefits. Transportation Research Board 2012 Annual Meeting. Victoria (Canada): Vitoria Transport Policy Institute. Retrieved from http://www.vtpi.org/cong_relief.pdf

Louf, R., & Barthelemy, M. (2014). How congestion shapes cities: from mobility patterns to scaling. *Scientific Reports*, 4(5561). <http://doi.org/10.1038/srep005561>

Martens, M. J., & van Griethuysen, S. (1999). The ABC location policy in the Netherlands. Retrieved from <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572236303/abc.pdf>

Milego, R., & Ramos, M. J. (2013). Disaggregation of socioeconomic data into a regular grid and combination with other types of data (ESPON). Technical Report, ESPON. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Disaggregation+of+socioeconomic+data+into+a+regular+grid+and+combination+with+other+types+of+data#0>

Morris, J. M., Dumble, P. L., & Wigan, M. R. (1979). Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research Part A: General*, 13(2), 91–109. [http://doi.org/10.1016/0191-2607\(79\)90012-8](http://doi.org/10.1016/0191-2607(79)90012-8)

Moya-Gómez, B., & García-Palomares, J. C. (2015). Working with the daily variation in infrastructure performance on territorial accessibility. The cases of Madrid and Barcelona. *European Transport Research Review*, 7(2), 1–13. <http://doi.org/10.1007/s12544-015-0168-2>

OECD. (1999). Traffic congestion in Europe. Road Table Report. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Traffic+Congestion+in+Europe#1>

Ortúzar, J. D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport* (4th ed.). West Sussex (United Kingdom): John Wiley & Sons. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=410941>

Owen, A., & Levinson, D. (2014). *Access Across America: Transit 2014*. Minneapolis (Minnesota - United States of America).

Owen, A., Levinson, D., Owen, A., & Murphy, B. (2016). *Access Across America : Auto 2015*.

Páez, A., Scott, D. M., & Morency, C. (2012). Measuring accessibility: positive and normative

implementations of various accessibility indicators. *Journal of Transport Geography*, 25, 141–153. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016>

Reggiani, A., & Martín, J. C. (2011). Guest Editorial: New Frontiers in Accessibility Modelling: An Introduction. *Networks and Spatial Economics*, 11(4), 577–580. <http://doi.org/10.1007/s11067-011-9155-x>

Rode, P., Floater, G., Thomopoulos, N., Docherty, J., Schwinger, P., Mahendra, A., ... Slavcheva, R. (2014). *Accessibility in Cities : Transport and Urban Form*. London (the United Kingdom). Retrieved from <http://files.lsecities.net/files/2014/11/LSE-Cities-2014-Transport-and-Urban-Form-NCE-Cities-Paper-03.pdf>

Schrank, D., Eisele, B., & Lomax, T. (2012). TTI's 2012 urban mobility report. Retrieved April 25, 2014, from <http://d2dtl5nnlpfr0r.cloudfront.net/tti.tamu.edu/documents/mobility-report-2012.pdf>

Sim, A., Yaliraki, S. N., Barahona, M., & Stumpf, M. P. H. (2015). Great cities look small. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(109). <http://doi.org/10.1098/rsif.2015.0315>

Stopher, P. R. (2004). Reducing road congestion: a reality check. *Transport Policy*, 11(2), 117–131. <http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2003.09.002>

Straatemeier, T. (2008). How to plan for regional accessibility? *Transport Policy*, 15(2), 127–137. <http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.002>

Sweet, M. N. (2011). Does Traffic Congestion Slow the Economy? *Journal of Planning Literature*, 26(4), 391–404. <http://doi.org/10.1177/0885412211409754>

Sweet, M. N. (2014). Do firms flee traffic congestion? *Journal of Transport Geography*, 35, 40–49. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.01.005>

Sweet, M. N., Harrison, C. J., & Kanaroglou, P. S. (2015). Gridlock in the Greater Toronto Area: Its geography and intensity during key periods. *Applied Geography*, 58, 167–178. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.011>

Tilahun, N., Yin, S., Li, M., & Keita, Y. (n.d.). Mapping Metropolitan Chicago's Accessibility. Retrieved April 25, 2016, from <http://urbanaccessibility.com/accessibility/>

TomTom. (2013a). Speed Profiles. Retrieved January 20, 2014, from http://www.tomtom.com/en_gb/licensing/products/traffic/historical-traffic/speed-profiles/#tab:tab1

TomTom. (2013b). TomTom European traffic index. Retrieved from [http://www.tomtom.com/lib/doc/trafficindex/2013-0129-TomTom Congestion-Index-2012Q3europe-km.pdf](http://www.tomtom.com/lib/doc/trafficindex/2013-0129-TomTom%20Congestion-Index-2012Q3europe-km.pdf)

Turok, I., & Mykhnenko, V. (2007). The trajectories of European cities, 1960–2005. *Cities*, 24(3), 165–182. <http://doi.org/10.1016/j.cities.2007.01.007>

UN HABITAT. (2013). Planing and design for sustainable urban mobility. Global Report on Human Settlement 2013. New York, NY (United States of America): United Nations. Retrieved from <http://unhabitat.org/planning-and-design-for-sustainable-urban-mobility-global-report-on-human-settlements-2013/>

van Wee, B. (2016). Accessible accessibility research challenges. *Journal of Transport Geography*, 51, 9–16. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018>

Vandenbulcke, G., Steenberghen, T., & Thomas, I. (2009). Mapping accessibility in Belgium: A tool for land-use and transport planning? *Journal of Transport Geography*, 17(1), 39–53. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008>

Weibull, J. W. (1976). An axiomatic approach to the measurement of accessibility. *Regional Science and Urban Economics*, 6, 357–379. [http://doi.org/10.1016/0166-0462\(76\)90031-4](http://doi.org/10.1016/0166-0462(76)90031-4)

Paper 4: The spatial–temporal dynamics in job accessibility by car in the Netherlands during the crisis: Impacts of infrastructure investments, congestion, and the spatial developments for 2009-2014.

Moya-Gómez, B. and Geurs, K.T. (Under review). Regional Studies. First submit version.

Abstract

This paper analyses spatial-temporal dynamics in potential job accessibility by car in the Netherlands during the period of the economic crisis (2009-2014). We examine the impact of changes in the spatial distribution of jobs and road infrastructure investments, and observed traffic flow changes through a dynamic-accessibility approach. The paper shows that access to jobs became more transport-dependant, due to job position losses in almost the entire country. In the Amsterdam region alone, the main agglomeration in the country, job accessibility during peak increased during the crisis years, due to a combination of transport investments and an increasing concentration of jobs.

Keywords: Job accessibility, dynamic accessibility, traffic congestion, spatial-temporal patterns, economic crisis, the Netherlands.

1. Introduction

Accessibility is a key concept in both transport and urban planning. Early definitions include “the potential of opportunities for interaction” (Hansen, 1959) and “the ease with which activities can be reached, given a location, using a specific transport system” (Morris et al., 1979). The key objectives of transport policies, not only at the urban, but also at the supra-national (such as The European Union), national and regional levels, are to improve accessibility. Accessibility is also a central concept that has become fundamental in physical planning and in spatial modelling for more than fifty years. Many different accessibility indicators have been developed. They typically focus on one or more of the four components of accessibility: (i) the land-use component, reflecting the amount, quality and spatial distribution of opportunities, (ii) the transportation component, describing the disutility of travel in terms of time, cost and effort, (iii) the temporal component, reflecting the temporal

constraints and variability, and (iv) the individual component, reflecting the needs and abilities of individuals (Geurs and Van Wee, 2004). The choice and operationalization of an accessibility measure depends on the object and aim of each study, see (Bruinsma & Rietveld, 1998; Curl et al., 2011; Geurs & Ritsema van Eck, 2001; Handy & Niemeier, 1997; Morris et al., 1979; Páez et al., 2012; Reggiani, 1999).

In this paper, we examine the temporal dynamics in job accessibility in the Netherlands during the period of economic crisis. Jobs are usually the main source of family incomes and any change in the quantity, quality and variety of job accessibility might alter individual lives and trigger reactions. These changes are clearly noticeable during global/local economic crises. Analysis of current job-accessibility values and changes may uncover some income vulnerabilities related to the high proportion of individual incomes, due to the lack of any alternative or of facing excessive commuting trips, see (Bocarejo S. & Oviedo H., 2012; Dodson & Sipe, 2008). Job accessibility can be a decisive aspect for moving or commuting, in addition to others (Eliasson, Lindgren, & Westerlund, 2003). However, local and nearby labour markets and their evolution are “determined by location decisions by firms and households in combination with decisions concerning commuting” (Johansson et al., 2002), so this may be considered the intra/inter-cooperation spatial complex results between different socioeconomic actors and cities (Reggiani, Bucci, Russo, Haas, & Nijkamp, 2011). In general, a high proportion of workers have similar schedules and bring the transport networks to their limits. Congestion appears on road network sections in metropolitan regions, and this can become a recurrent temporal obstacle for reaching jobs. Congestion has economic consequences, but also affects workers directly (M. N. Sweet, 2011), and it can influence job searching processes and its derivate reactions, such as moving house or commuting. Congestion is a purely dynamic phenomenon, yet accessibility studies have used static approaches until recently. Static accessibility models do not capture the temporal dynamics in delays and congestion, and create unrealistic study cases (Joe Weber & Kwan, 2002) (Kwan, 2013). Moreover, static accessibility models cannot properly deal with dynamic traffic management strategies, which nowadays are an important part of increasing road infrastructure capacity, or rescheduling education/job schedules, which is of interest to smooth journey flow values. The growing abundance of detailed spatial data and (almost) real-time transport datasets provides many opportunities for improving accessibility modelling and assessing a wide scope of dynamic consequences covered.

The aim of this paper is to estimate spatial-temporal dynamics in job accessibility by car in the

Netherlands during the economic crisis between 2009 and 2014, distinguishing between the effects of job activity changes, road network improvements and traffic flow changes. Our analysis is based on high-resolution dynamic data from TomTom® navigation devices.

The rest of the paper is structured as follows: Section 2 describes spatial-economic developments, transport infrastructure and mobility changes in the Netherlands between 2009 and 2014. Section 3 explains the methodology of this analysis. Section 4 introduces the data used. Section 5 analyses of the results. The final section draws conclusions and describes directions for further research.

2. The Netherlands between 2009 and 2014

The Netherlands is known to be one of the densest countries in Europe, with relatively low unemployment rates. The world economic crisis between 2009 and 2014 led to change in Dutch economy and society. At the country level, the number of job positions decreased from 8.2 million in 2009 to scarcely 8 million in 2014 (Stichting LISA, 2016), especially in construction, agriculture and the financial sector. On the other hand, the worker population (15-64 years of age) was stagnated at around 11.1 million people. The result was an increase in unemployment rates from 4.4% to 7.9% during the economic crisis (Statistics Netherlands, 2017a). The Netherlands has slowly recovered from the economic crisis since 2015, and unemployment rates mid-2017 are almost at pre-crisis levels.

In this section, changes in population and distribution at the national and regional level during the crisis years were described (Section 2.1), continuing with a description of road infrastructure investments, static or dynamic, in Section 2.2.

2.1. Population and job distribution changes, 2009-2014

Population and job positions are not evenly distributed in the Netherlands, and the effects of the crisis were also not evenly distributed. Figure 1 shows the concentration patterns for population and jobs by municipalities⁸⁶ for 2009 and the relative changes for 2014. Both variables had similar geographical distribution. The highest population/job position density area of the Netherlands is the Randstad area, comprising the four largest cities (Amsterdam, Rotterdam, The Hague and Utrecht), and several middle-sized cities. Other job concentrations

⁸⁶ Municipality delimitations in 2010

are found Noord-Brabant, Arnhem Nijmegen region, in the Zuid-Limburg, the Twente region, and the Groningen region. During the crisis years, the working population increased in almost all main cities in the Netherlands, with the strongest increase in and around the main cities in the Randstad area. Job density growth is found in only a few cities and their near surroundings around Amsterdam and Utrecht, in the Randstad area, Arnhem, and Eindhoven. In the same period, a substantial part of the country showed a decrease in the number of available jobs. The Southwest of the Randstad area, some cities in the Noord-Brabant, and Zuid-Limburg lost up to 10% of job positions.

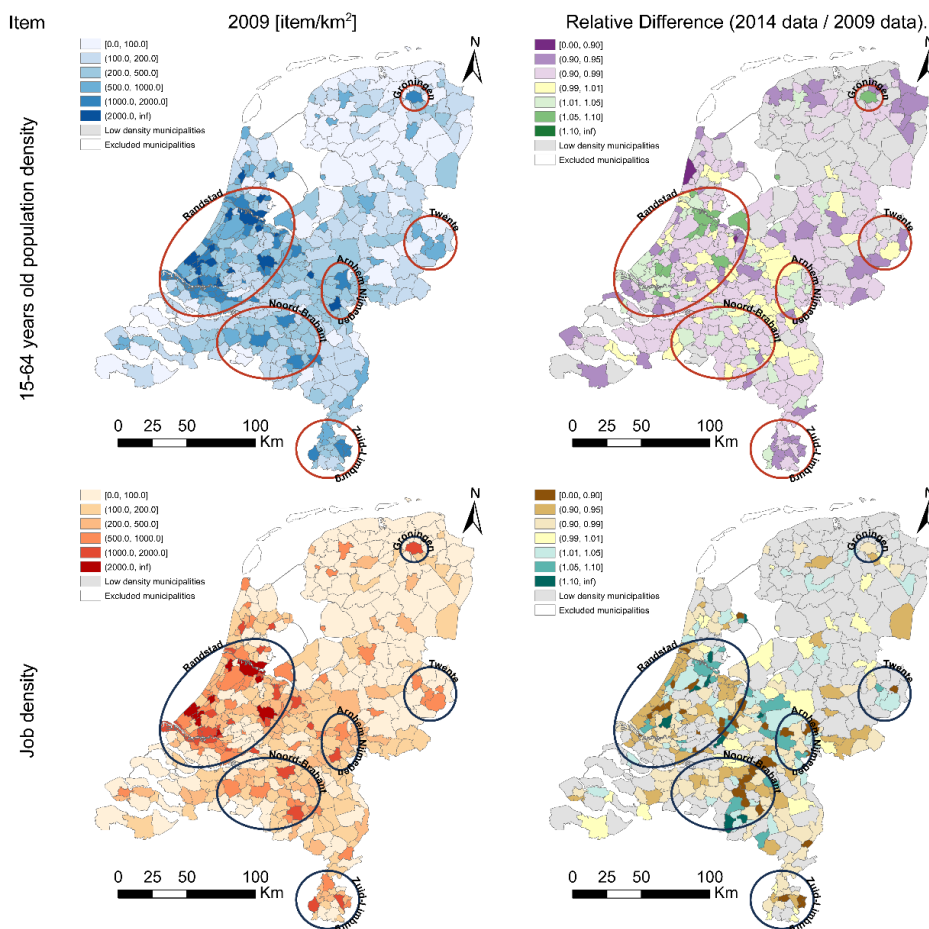


Figure 1⁸⁷: Population and Job position density distribution in 2009 and relative changes to 2014. Low-density municipalities have less than, or equal to 100 item/km².

⁸⁷ The coordinate projection system of all maps is Lambert Azimuthal Equal Area (LAEA) – ERTS 89. Color ramps of polygon maps are from ColorBrewer2 collection (Brewer & Harrower, 2013).

2.2. Road infrastructure investments

During the pre-crisis years, reducing congestion was a prime policy goal in Dutch national transport policy. Between 2000 and 2008, traffic flow increased by 14% and total travel time lost⁸⁸ on the main motorway network increased by 55% (Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM), 2008). The Dutch government responded with major road infrastructure investments. Figure 2 shows that road network capacity was improved between July 2011⁸⁹ and September 2014. Almost 300km of major roads were improved, e.g., more lanes, increasing intersection capacity and urban bypasses; the third part of these investments was between Eindhoven and Utrecht, on the A2 motorway, and in Amsterdam and Utrecht's surroundings (Figure 2 left). There also were 160km of new major roads, most of them road detours. Regarding dynamic improvements, the length of the dynamic lanes⁹⁰, shoulder running lanes (spitsstroken) and plus lanes (plusstroken), grew by 75km, up to 375km in the entire country (Figure 2 right). Other speed measures were applied during this period: variable maximum speed and dynamic traffic information, and an off-peak higher maximum speed (130km/h) since 2012 in some sections. The TomTom® data also shows some other changes on other roads, especially in urban zones, such as changing directions and new car-free areas.

Motorway expansions clearly affected congestion levels. Although traffic volume during rush hours on motorways increased by 15% between 2009 and 2014, the total time lost on major routes decreased from 61.9 million hours to 45.4 million hours. Congestion severity⁹¹ decreased by 38.5%, travel time lost decreased by 33.7% and total lost time⁹² also decreased by 26.7%, and the most congested average length decreased from 110km in 2011 to 95km in 2014 for the morning peak, and from 142km to 130km during the afternoon peak (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2015). To sum up, the improvements and enlargements provided enough capacity to reduce congestion.

⁸⁸ Travelling speed slower than 100km/h

⁸⁹ See section 3.5. We used 2011 and 2014 road network definitions.

⁹⁰ These lanes open if the traffic flow is higher than 1,350 veh./hour, and the maximum speeds on all lanes then drops to 80 or 100km/h.

⁹¹ Travel time losses on motorways with traffic queues longer than 2km with average speed slower than 50km/h.

⁹² Travelling speed slower than 100km/h.

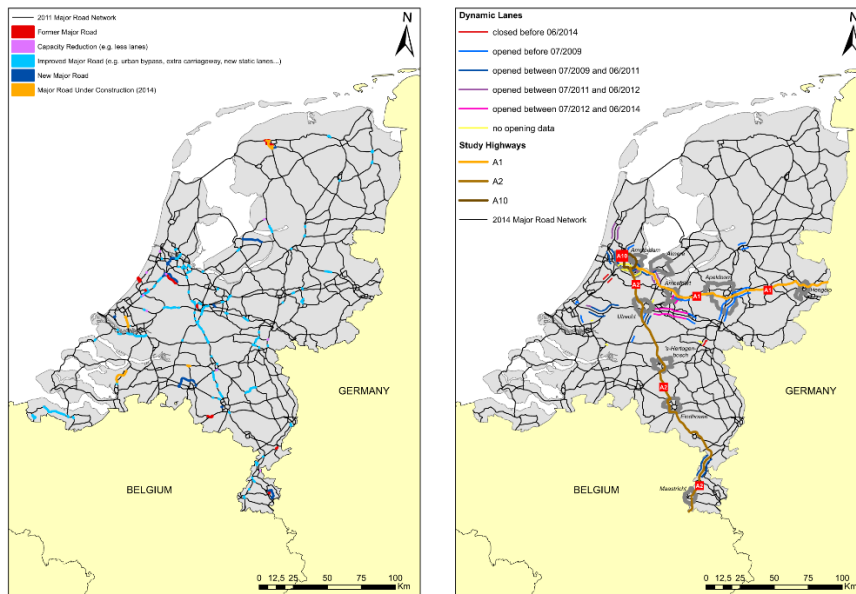


Figure 2: Changes in Dutch major road network between 2011 and 2014. Sources: TomTom® and Dutch Government.

3. Methodology for comparing dynamic daily accessibility patterns

In this section, the methodology to assess temporal dynamics in job accessibility is described. Section 3.1 describes the dynamic accessibility approach, and Section 3.2 a framework to disentangle the influences of land use and transport changes on accessibility over time.

3.1. A dynamic accessibility approach

In this paper, a modification of the well-known potential accessibility (Hansen, 1959) is used to introduce temporal dynamics in job accessibility. Potential accessibility counts how many weighted opportunities every zone/individual may reach (Cascetta et al., 2016). The weight of every destination from each origin is obtained from the impedance decay function. Its results may be interpreted as the equivalent opportunities with no impedance value.

Temporal dynamics are introduced by using dynamic impedance values (Equation 1), i.e., taking into account when links are used on every route and its temporal variation in travel speeds across the day. Since travel speeds continuously change due to congestion, each Origin-Destination relationship was calculated every 15 minutes to obtain dynamic variation.

These impedances are calculated as travel times by the hierarchical First In First Out (FIFO) dynamic shortest route algorithm, implemented in ArcGIS 10.3. This simplifies the computation process by avoiding overtakes (Dean, 2004) and constricts temporal options: waiting is not an option to arrive earlier at any destination. The opportunity component is a set of constant values throughout the day. This dynamic accessibility approach follows Weibull's accessibility axiomatic (1976).

$$A_i^t = \sum_{j \in N} D_j \cdot f(c_{ij}^t), \forall i \in N, t \in DT$$

s.t:

Eq. 1

$$c_{ij}^t = \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} \alpha_{eij}^{tm} \cdot c_e^m, \forall i \in N, j \in N, t \in DT$$

$$\text{FIFO condition – arrival time: } t_k + c_{kl}^t \leq (t+1)_k + c_{kl}^{t+1}$$

Where: A_i^t is the active potential accessibility value of origin i , departing at time t . D_j is the number of opportunities of destination j . $f(c_{ij}^t)$ is the impedance decay function that determines the possibility of spatial interaction. c_{ij}^t is the impedance experienced when travelling from origin i to destination j by the dynamic shortest route, departing at time t . α_{eij}^{tm} is the dummy variable that indicates whether network link e at time m is used for the trip between origin i and destination j departed at time t . c_e^m is the expected impedance of network link e at time m . t_k is departing time t in node k . N represents all the zones included in the calculation area. G is the set of origin-destination relationships, including the same origin-destination zone. DT is the set of time of departing trips, every 15 minutes in this paper. M is all possible time instants within the study. The unit of the impedance is minutes.

The results of equation 1 for every zone might be summarized by some higher-rank territorial unit and part of the day (Equation 2).

$$A_{lp} = \frac{\sum_{i \in N} \beta_{il} \cdot O_i \frac{\sum_{t \in p} A_i^t}{|t \in p|}}{\sum_{i \in N} \beta_{il} \cdot O_i}, \forall p \in P, l \in L$$

Eq. 2

Where: A_{lp} is the mean weighted accessibility of higher-rank territorial unit l for period p . β_{il} is a dummy variable, it indicates if zone i belongs to higher-rank territorial unit l ; every zone i

belongs to a unique higher-rank territorial unit per level. O_i is the weight of zone i . l is each higher-rank territorial unit in the L set of higher-rank territorial units. p is a subset of contiguous departing times at T of each study period in the P set of the parts of the day.

3.2. The comparison framework of the daily accessibility patterns between situations

Changes in accessibility between years are a consequence of a myriad of effects, such as the redistribution of opportunities, changes in transport services or infrastructures and their performance, and even individual changes in preferences (Haugen, Holm, Strömgren, Vilhelmson, & Westin, 2012). In this study, four situations were calculated to compare simplifications of the effects of the component changes on accessibility, excluding possible interactions between the components as implemented in a similar approach by Geurs and Ritsema van Eck (2003) (Equation 3): the reference year where the first-year data was used for both accessibility components (land uses and transport), the final year which used the last-year data, and two partial situations, which use data from the first year for one component and from the last year for the other component together. The three comparisons were used to understand the effects of each component at the very same part of the day, based on the basis situation (Equation 4).

$$\begin{aligned}
 (\text{Reference year: } RY) A^{RY} &= g(D^{RY}, f(\theta, C^{RY})) \\
 (\text{Land uses changes: } LC) A^{LC} &= g(D^{FY}, f(\theta, C^{RY})) \\
 (\text{Transportation changes: } TC) A^{TC} &= g(D^{RY}, f(\theta, C^{FY})) \\
 (\text{Final year: } FY) A^{FY} &= g(D^{FY}, f(\theta, C^{FY}))
 \end{aligned}$$

Eq. 3

Where: A is the dataset of accessibility values. $g(\cdot)$ is an accessibility measurement function. D is the land-use component. C is the transport-impedance component. $f(\theta)$ is the impedance-function type. θ are the parameters of the impedance-decay function. The superscripts indicate which dataset and calculus conditions are used.

$$\text{Land uses change effects (a)} = \frac{A^{LC}}{A^{RY}}$$

$$\text{Transportation change effects (b)} = \frac{A^{TC}}{A^{RY}} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\text{Combined effects (c)} = \frac{A^{FY}}{A^{RY}}$$

The situations assume that the impedance-decay function parameters are invariable, i.e., trip preferences did not change, and the transport-performance component only depended on infrastructure, i.e., spatial distribution changes did not change traffic flows.

4. The data

In this section, the raw data for calculation is explained. We split them into the three components of accessibility: land uses (4.1.), transport (4.2.) and aggregated individual (4.3.). The temporal component was also included in sections 4.1. and 4.2.

4.1. The land-use data: The spatial-temporal data of job position distribution.

The source of job position distribution data for 2009 and 2014 is *Landelijk InformatieSysteem van Arbeidsplaatsen* – National Job Information System – (LISA) data (Stichting LISA, 2016). LISA data includes the number of job positions, the economic category of the business, the address, and additional information, for each business in the Netherlands. LISA data were summarized to the 2010 version of Post Code 4-digit (PC4) zones for this paper. The PC4 zones were used as raw calculation Origin-Destination (OD) zones to calculate the raw accessibility values. There were 4,010 PC4 zones in the Netherlands, excluding zones completely within islands and post boxes. The PC4 zones were classified into two categories to define the location of their centroid: in residential zones⁹³, the centroid is located in the population-weighted centre of population mass, from the 100m x 100m square dataset (Statistics Netherlands, 2015). Otherwise, it is located in the geometrical centroid.

Accessibility results were summarized into municipalities, in order to smooth values and facilitate comprehension of the results. In total, there were 426 municipalities in 2010, excluding municipalities that are completely within the islands.

⁹³ Residential zones are where the jobs/population ratio is smaller than 2.2 (it is the percentile 95 value) and where there are at least 0.5 jobs in services sector per inhabitant. The average value for 2009 is 0.4932 total jobs/inh.

4.2. The transport component: The road network and road performances.

The road networks in this study are sourced from two versions of two TomTom® products. The Dutch road network is defined by the TomTom® Multinet (September 2011 and September 2014 versions). The main road network was used, i.e., links in categories 0 to 6 of the TomTom® Functional Road Classification (FRC)⁹⁴ without ferry services. Full connectivity was always guaranteed.

The second product is the TomTom® Historical Speed Profile (HSP). This is made up of the speed values averaged every 5 minutes (TomTom, 2013a) from the previous 24 months (see Table 1), from at least 1,000 observations every 5 minutes reported by TomTom® devices. These data are free of outlier situations, e.g., short maintenance works, accidents or bad weather conditions. Despite some differences between both HSP versions (see Table 1), it was not possible to use the same predefined profile set because there is no unique possible relationship between both sets. However, the most probable relationships were quite similar in shape and intensity.

	September 2011 version	September 2014 version
Data collection period	July 2009 – June 2011	July 2012 – June 2014
Predefined profiles	98	293
Not free flow speed between	4:30 – 21:20	4:00 – 21:50
% Km major road with HSP (FRC 0, 1 & 2)	99.32	99.27
% Km secondary road with HSP (FRC 3)	99.10	99.09
% Km local road with HSP (FRC 4, 5 & 6)	55.33	56.68
% Km study road network with HSP	62.39	63.64
% Km study road network / Km total road network	55.39	55.09

Table 1: Summary of 2011 and 2014 version of TomTom® data.

4.3. The aggregated individual component: The impedance-decay function

A unique impedance-decay function was calibrated for the entire country and every situation. It was obtained from the car commuter journey records at the 2010 Dutch national travel survey (Statistics Netherlands, 2011). These records show that: less than 2% of car commuter journeys took longer than 90 minutes, and the reported times were usually divisible by 5 (L. Miguel Martínez & Viegas, 2013). As a result, the data for calibrating the impedance function

⁹⁴ TomTom®'s FRC Definitions. FRC 0: Motorway, Freeway, or Other Major Road; FRC 1: Major Road Less Important than a Motorway; FRC 2: Other Major Road; FRC 3: Secondary Road; FRC 4: Local Connecting Road; FRC 5: Local Road of High Importance; FRC 6: Local Road; FRC 7: Local Road of Minor Importance; FRC 8: Other Roads.

is truncated at 90 minutes, and calculation values were gathered in groups of 5 minutes.

Many different impedance functions have been used in accessibility studies. See for overviews, for example, Ingram (1971), Geurs & Ritsema van Eck (2001) and Östh, Lyhagen, & Reggiani (2016). Five well-known types of impedance-decay functions were calibrated by R-Project, but only the best-fitted one, i.e., with the lower Akaike Information Criterion (AIC) value, was used. These were: the inverse potential (AIC = 2.3377), negative exponential with one parameter (AIC = -34.7498), negative exponential with two parameters (AIC = -41.7925), Gaussian (AIC = -73.2205), and Log-Logistic (AIC = -86.2425). The Log-Logistic Function and its calibration parameters were used in this paper (Equation 5⁹⁵). Thorsen, Ubøe, & Nævdal(1999) also provide a theoretical justification for such an S-shaped curve, where short distances give random commuting flows, and long distances are governed by a minimum cost principle.

$$f(c_{ij}^t) = \begin{cases} \frac{1}{1 + e^{\theta_2 \cdot (c_{ij}^t)^{\theta_1}}}, & \text{if } c_{ij}^t < 90 \text{ min} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Eq. 5

$\theta_1, \theta_2 \in \mathbb{R}$ impedance – decay function parameters

$\theta_1 = 2.767093027, \theta_2 = -8.789731669$ whole week calibrated values

5. The impact of changes on job distribution and/or transport on job accessibility developments

In this section, changes in the spatial-temporal distribution of job accessibility values are discussed. Different maps were plotted in order to provide thorough understanding of the consequences of the changes. In the first part, the absolute values of the reference situation are described and analysed. Then, the reference situation is compared to the other situations. The last part points out which component change is most determinant in every municipality every day, and the clustering patterns. Three parts of the day were used in this section to summarise results: The Morning peak (between 07:00 and 08:30), Midday (between 11:15 and 12:45), and the Afternoon peak (between 16:00 and 17:30), extreme hours included. In this section, the word “accessibility” refers to job accessibility by car, and job position refers to the land-use component.

⁹⁵ Previous log-logistic impedance decay function was rewritten in order to avoid some logarithm conceptual limitations.

5.1. The spatial-temporal distribution of job accessibility values in the reference year (2009)

Figure 3 shows the spatial distribution of accessibility per day and period of the day in the reference year (2009). The results show almost concentric patterns with higher values in the Randstad area, especially close to Amsterdam and Utrecht. Only remote areas have less than 250,000 weighted jobs in every part of the day. In the morning, main cities had high accessibility values, while the rest of the country experienced its worst values. At midday, accessibility values were higher in the entire country. In the afternoon peak, accessibility was appreciably reduced in the main cities and their surrounding areas. This pattern seems logical, since traffic usually flows towards cities during the morning peak, and flows away from cities in the afternoon. Moreover, a high number of opportunities in the same area may have counteracted the effects of congestion. There is a substantial variation in accessibility across the days of the week, with the lowest accessibility values observed on Tuesdays and Thursdays.

5.2. How did road network and job distribution changes affect spatial-temporal job accessibility distribution? The winners and losers.

Figures 4, 5 and 6, show the spatial distribution of changes during the crisis years 2009-2014, due to changes in job distributions, transport infrastructure capacity and traffic flow, and their combined effects, respectively. Changes in the number and spatial distribution of jobs produce almost static effects (Figure 4). In general, the new job position distribution causes a decrement of up to 5% in the greater part of the country, and the worst results were in the southernmost part of the Netherlands (Zuid-Limburg), where heavy job losses were found. The only exceptions were very concentrated in and around Amsterdam, where the strongest increase in jobs took place and job accessibility improvements are observed. Finally, municipalities in the area closest to Amsterdam, near the internal lagoon coast and along the corridor to the Northeast, had no accessibility changes, since they maintained, or barely increased, their job densities. Notice that some zones with much higher job position density in 2014 compared to 2009 also deteriorated their accessibility value because of their neighbours' losses; for instance, the increase in Eindhoven, Utrecht and Arnhem's surroundings was clearly insufficient to compensate the job position losses in the other, closer locations.

The effects of transport changes (Figure 5) varied throughout the day and zones, which

stresses the importance of the main flow directions and volumes in the results. In both peaks, almost the entire country had a positive effect, except in the Northern provinces and other peripheral areas. In the morning, Amsterdam and Utrecht's outskirt municipalities had the greatest accessibility increments, up to 10%, while accessibility increments in Amsterdam and Utrecht were less than 5%. The strongest and most spatially-varying accessibility changes are found on Thursday mornings. On the contrary, the greatest increments in the afternoon were concentrated in Amsterdam and its southern area, where the most important road static investments had taken place. On Friday morning and at midday, almost all municipalities at least maintained their accessibility values, except in Northern and Eastern zones, where accessibility values decreased. These results may indicate transport investments mainly focused on reducing specific congestion gridlocks. However, some residual improvement in off-peak hours was clearly observed near sections with static improvements, especially throughout the A2 motorway between Utrecht and Eindhoven. This may be a consequence of fewer traffic interactions, even due to the static increase of capacity; it may also occur even with greater traffic flow.

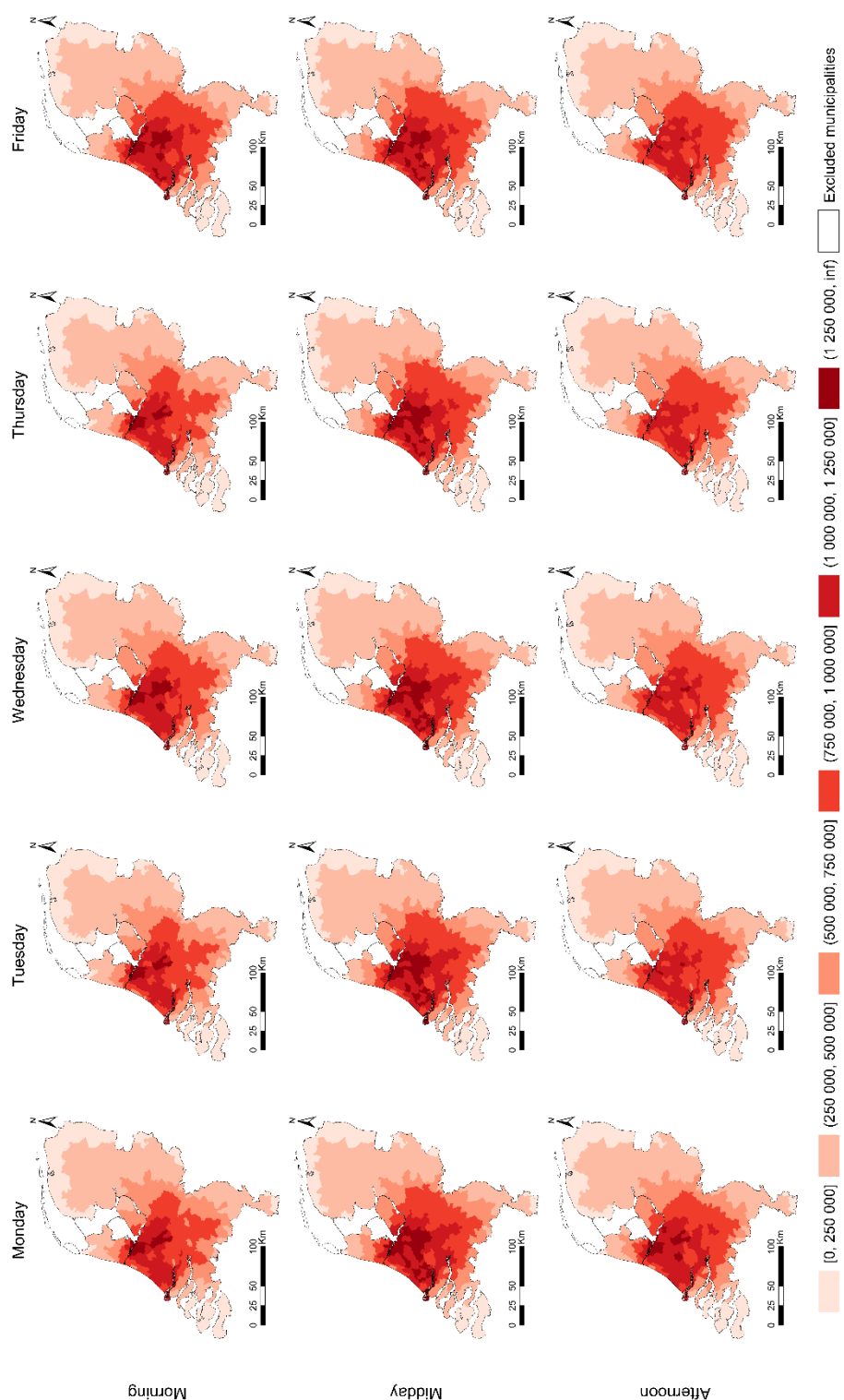


Figure 3: Spatial distribution of job accessibility in 2009 [impedance-weighted jobs].

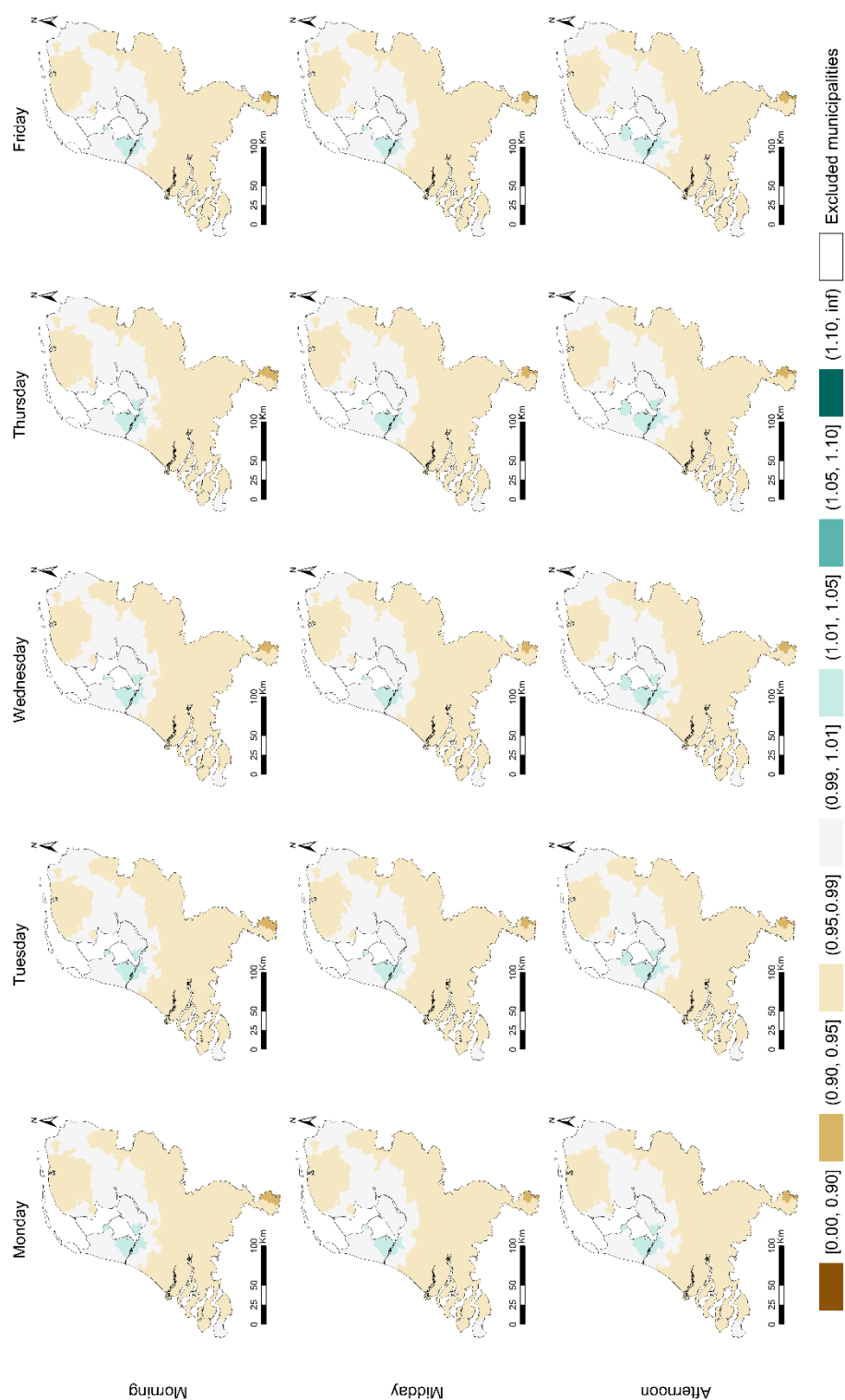


Figure 4: Spatial distribution of relative effects of job distribution changes in job accessibility values (Eq. 3a). Base 2009 = 1.

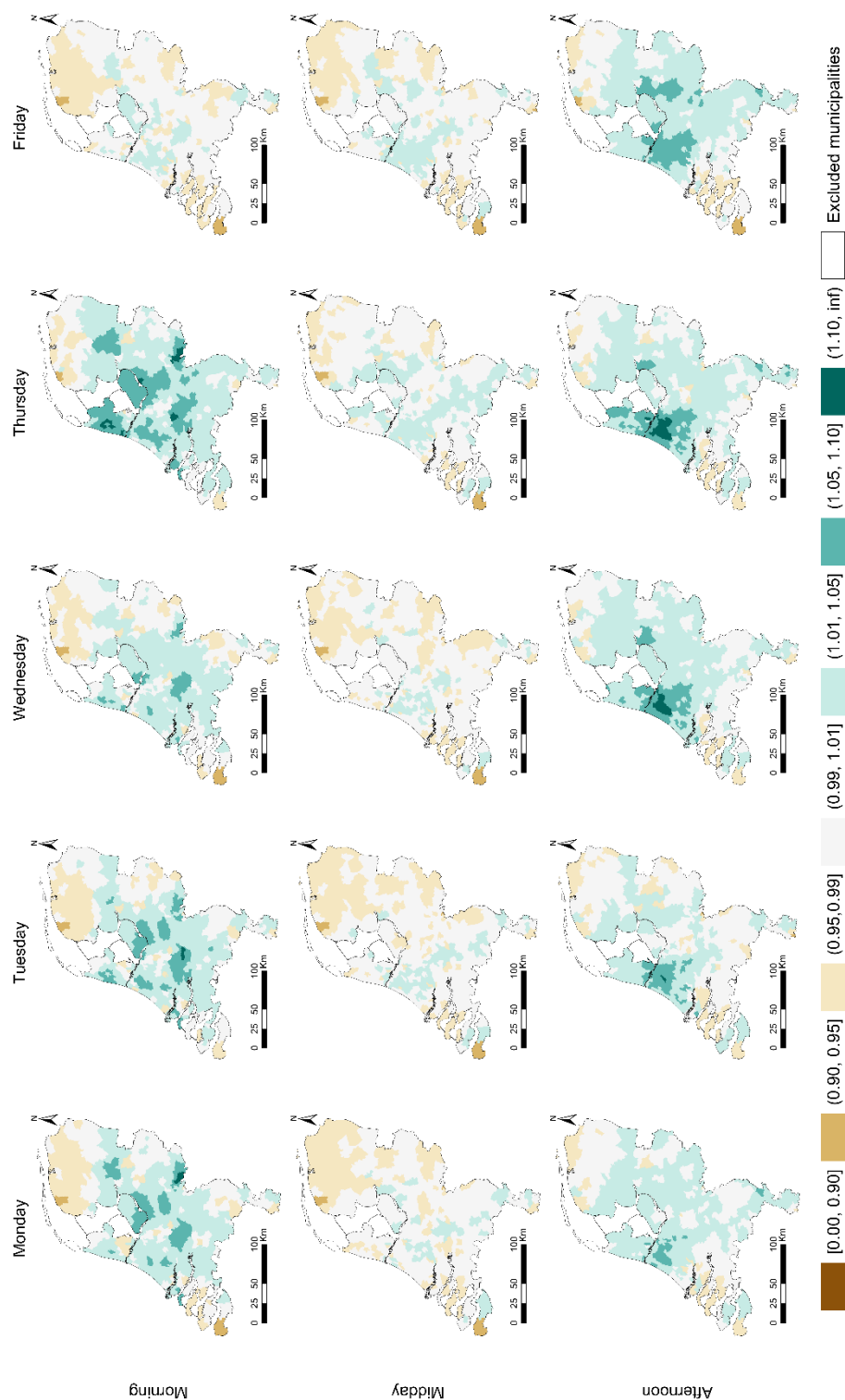


Figure 5: Spatial distribution of relative effects of transport changes in job accessibility values (Eq. 3b). Base 2009 = 1.

Figure 6 is the map of the winning and losing municipalities, due to fully changing potential job accessibility: this figure shows the spatial pattern of effects on accessibility due to the combined effect. During peaks, accessibility changes were similar to transport changes with job position. Some municipalities, such as Almere during the mornings, or Amsterdam and the nearest surroundings in the afternoons, also had the additive positive effects of new job position distribution; they did not achieve these increases by changing only one component. However, in a great part of the country, there were counteracting effects between both components, i.e., some municipalities have high positive transport change effects, but they were insufficient to compensate the effect of the new job position distribution on accessibility. At midday, the change in accessibility distribution is closer to the effects of job position changes, since congestion should have been lower at this part of the day. There were some notable exceptions, such as A2 motorway sections on Tuesdays and Thursdays. The results seem to confirm that transport investments focused on managing traffic flow in peak hours, and new job position distribution, impacted more during off-peak hours.

5.3. *What is the dominant change in spatial-temporal accessibility distribution?*
Weak or strong changes?

Finally, interpreting the spatial-temporal variation in job accessibility changes can be quite complex, as this is a result of interactions between job density changes, road infrastructure improvements, and dynamics in travel times (between days and times of the day). On the other hand, knowing which municipalities are the winners and the losers of the changes in job accessibility is insufficient to properly evaluate the results. It is necessary to go further in depth and understand the dominant changes to determine if the changes are appropriate, or could merely produce weak accessibility changes. The concept of this calculation and classification

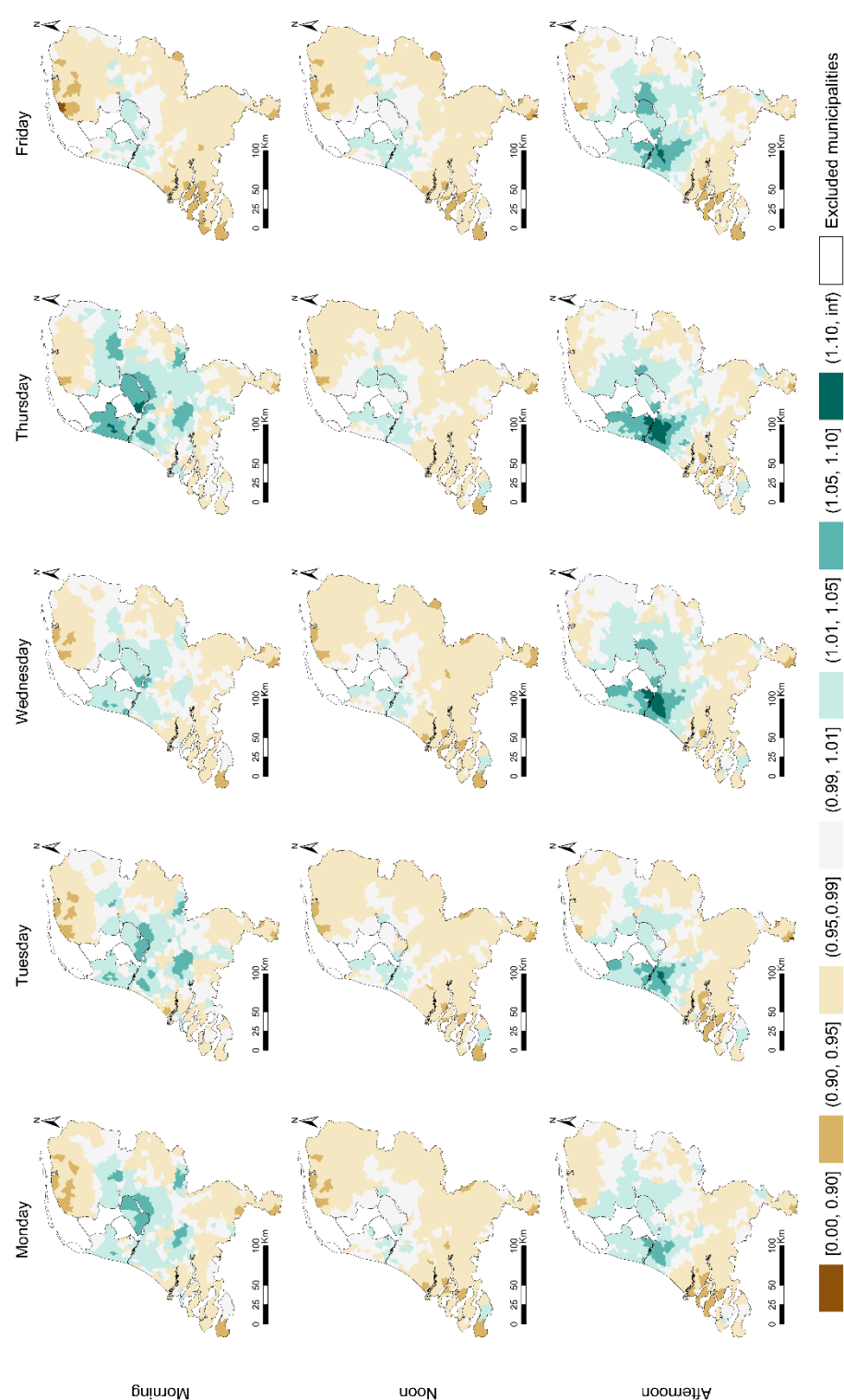


Figure 6: Spatial distribution of relative combined effects of jobs and job changes in job-accessibility values. (Eq. 3c). Base 2009 = 1.

is shown in the Appendix 1. Figure 7 shows the maps of this classification for every possible combination at the municipality level. These maps show some clustering patterns:

- Municipalities in group 1 received positive effects of both the land-use and transport components of accessibility. Municipalities in this group always have a higher job-accessibility index in 2014 when compared with 2009. There are two subgroups, with the Land-use (1L) or Transport component (1T) dominating the effect:
 - *Subgroup 1L*. This subgroup basically appears in the morning and at midday in Amsterdam, and some of Amsterdam's surrounding municipalities. The job density increases are the main reason for increasing their accessibility values.
 - *Subgroup 1T* is the main subgroup in the afternoon in areas closest to Amsterdam. In the morning and at midday, outskirt municipalities in the Amsterdam region belong to this subgroup. These municipalities reduced travel time to job locations, and also benefited from increasing job density.
- Municipalities in group 2 had the positive effects of job position changes, but travel times grew longer. This group received the benefits of being close to increased job density areas:
 - *Subgroup 2L*. This subgroup had more accessibility in 2014 than 2009. This group appeared in some Northeast outskirts of Amsterdam in the morning and at midday. These municipalities improved their accessibility, since job density increased close to them.
 - *Subgroup 2T*. This subgroup had less accessibility in 2014 than in 2009. Municipalities directly North of Amsterdam belong to this group at midday, when traffic conditions grew worse than in 2009, and increasing job position density in nearby areas was insufficient to properly counteract.
- In group 3, the municipalities lost accessibility because a large part of their jobs moved away and job travel time grew longer:
 - *Subgroup 3L*. This subgroup mainly appeared in the most peripheral zones throughout the entire day, major cities in the southwester part of the Randstad area, and in Utrecht at midday. These areas experience a relatively large decrease in jobs. Transport changes also decreased accessibility values, but these losses are fewer. An exception is Utrecht: it lost accessibility despite it increased job position density, but its neighbouring areas did lose job density.
 - *Subgroup 3T*. The Northeast municipalities mainly belonged to this subgroup in the morning and at midday. These zones had been highly dependent on

travel to some mid-distance job position concentration, and they moved away.

During the afternoon peak, only the remotest zones were in this subgroup.

- Group 4 is a counteracting group: the positive effects came from transport changes. In both subgroups, these municipalities became more transport-dependent. Their improvements can be considered weak because they might depend on short-term changes, e.g., their improvements might disappear with an increase in congestion:
 - *Subgroup 4L*. Transport changes directly benefited municipalities, yet the negative effects of new job concentration decreased accessibility value. It appeared mainly between group 2J and 3 municipalities, as the intermediate zone. This subgroup could be identified along the A2 corridor from Utrecht to the southern border on Mondays, Tuesdays and Wednesdays at midday. The South of Randstad also belonged to this group at both peaks.
 - *Subgroup 4T*. Municipalities 4T increased accessibility because they could reduce travel times to job positions, e.g., municipalities close to the major road to/from Amsterdam, with or without direct investments.

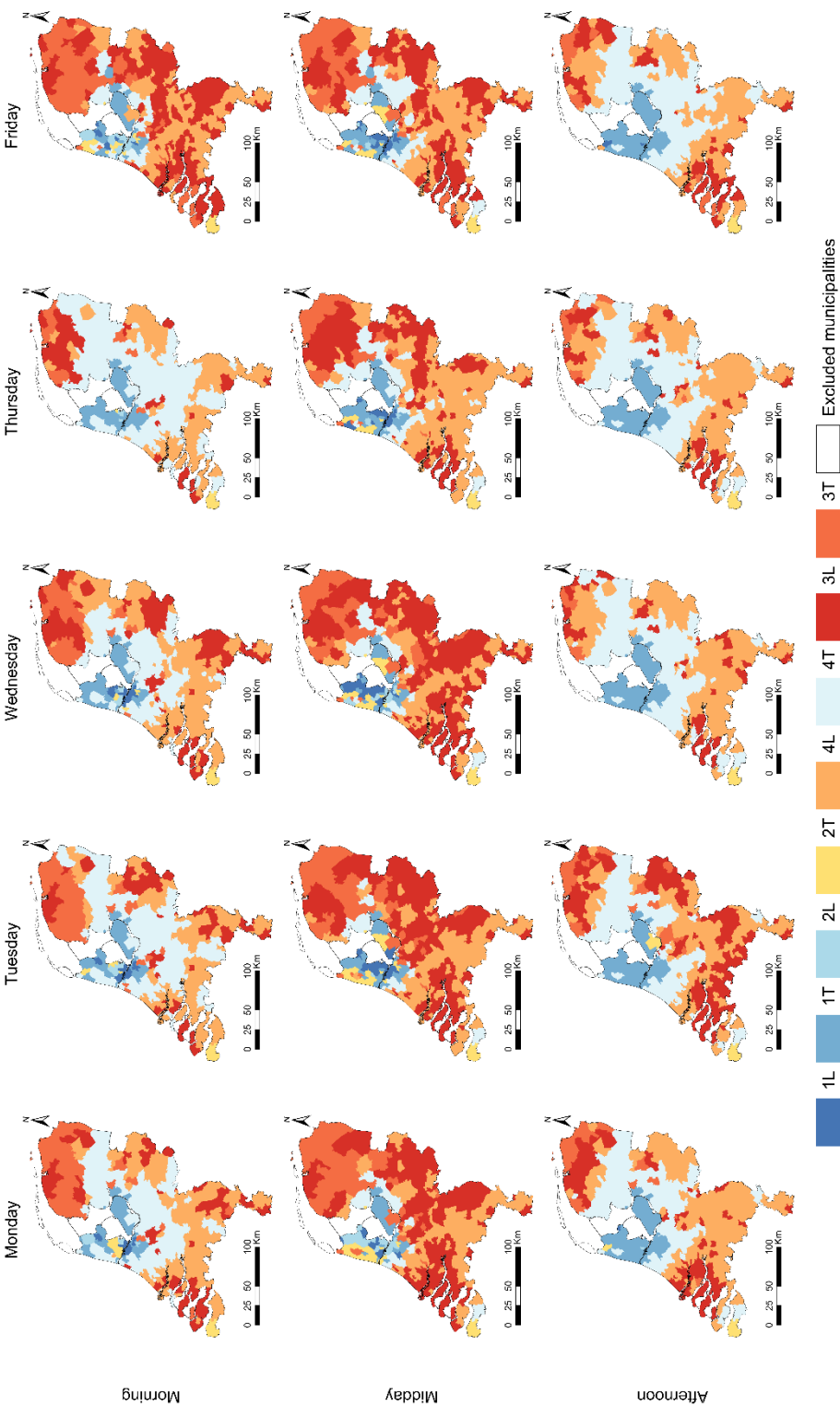


Figure 7: Spatial distribution of most determinant change and effects.

6. Conclusions and discussion

In this paper, the spatial and temporal dynamics in potential job accessibility by car was examined based on dynamic data from TomTom® navigation devices in the Netherlands during the economic crisis between 2009 and 2014. To explain spatial-temporal variations in job accessibility, we examined the separate effects of the different factors of job accessibility change, i.e., the effects of job density changes and road network improvements.

The spatial-temporal variation in job-accessibility changes during the crisis years is large, resulting from complex interactions between job density changes, road infrastructure improvements, traffic flow, and dynamics in travel times (between days and times of the day). However, the overall conclusion is that access to jobs during the crisis years became more transport-dependant due to job position losses in almost the entire country. In the Amsterdam region alone, the main agglomeration in the country and where a job concentration process took place, job accessibility by car increased by 5% or more during the crisis years, due to a combination of transport investments and an increasing concentration of jobs. Other parts of the Netherlands showed a clear decrease in job accessibility by car, up to 10% in some regions, in particular in the peripheral parts of the country.

Secondly, this study stated that dynamic and static road-capacity increases added to the Dutch road network during the crisis years only have a remarkable effect on peak-hour job accessibility in congested areas. Transport investments thus cannot compensate losses in job positions if these investments save little travel time at off-peak hours. Analysing dynamic job accessibility can thus be helpful in analysing the effects of coordinated land-use and transport policies, to avoid or reduce negative effects, and in questioning if the current and the foreseeable accessibility value are quite strong, or they might strongly depend on short-term changes, i.e., traffic congestion.

There are several directions that future research may take. Firstly, future research can focus on analysing social inequalities in job-accessibility changes for different population segments, e.g., examine how the economic crisis affected high or low-skilled workers. Secondly, this paper only focused on job accessibility by car. The effect of the economic crisis for workers relying on public transport is an interesting addition. Thirdly, additional accessibility measures incorporating competition effects can be considered. Fourthly, in the coming years, a similar study can be undertaken for the period after the economic crisis, given that some changes

need more time to become visible or to foster new situations. Traffic flows in the Netherlands have been increasing since 2014, and aggregate congestion levels on motorways have already reached 2009's values (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017). Fifthly, Levine, Merlin, & Grengs' (2017) noted that using ArcGIS Network Analyst to calculate which routes will experience delays neglects the fact that optimal routing changes with real-time traffic conditions. Accessibility effects of specific road project(s) can be studied more accurately if traffic flows are simulated, to allow possible inertias in traffic flows. A final direction for future research is to develop more advanced accessibility tools to conduct a joint analysis of spatial-temporal dynamics in accessibility measures, rather than splitting it into two parts (first a temporal part and second a spatial one) as done in this paper.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness for funding this research as part of the SPILLTRANS project (TRA2011-27095), the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and the European Regional Development Fund for funding this research as part of the DynAccess project (TRA2015-65283-R and FPD1 2013/17001), and the Spanish National Sub-Programme for Mobility (2013 and 2014 editions) within the National Programme for the Promotion of Talent and its Employability.

References

- Bocarejo S., J. P., & Oviedo H., D. R. (2012). Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments. *Journal of Transport Geography*, 24, 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.12.004>
- Brewer, C. A., & Harrower, M. (2013). ColorBrewer2. Retrieved August 8, 2014, from <http://colorbrewer2.org/>
- Bruinsma, F. R., & Rietveld, P. (1998). The accessibility of European cities: theoretical framework and comparison of approaches. *Environment and Planning A*, 30(3), 499–521. <https://doi.org/10.1068/a300499>
- Cascetta, E., Cartenì, A., & Montanino, M. (2016). A behavioral model of accessibility based on the number of available opportunities. *Journal of Transport Geography*, 51, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.11.002>

Curl, A., Nelson, J. D., & Anable, J. (2011). Does Accessibility Planning address what matters? A review of current practice and practitioner perspectives. *Research in Transportation Business & Management*, 2, 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2011.07.001>

Dean, B. (2004). Shortest paths in FIFO time-dependent networks: Theory and algorithms. Rapport technique, Massachusetts Institute of Technology. Boston. Retrieved from <http://people.csail.mit.edu/bdean/tdsp.pdf>

Dodson, J., & Sipe, N. (2008). Shocking the Suburbs: Urban Location, Homeownership and Oil Vulnerability in the Australian City. *Housing Studies*, 23(3), 377–401. <https://doi.org/10.1080/02673030802015619>

Eliasson, K., Lindgren, U., & Westerlund, O. (2003). Geographical Labour Mobility: Migration or Commuting? *Regional Studies*, 37(8), 827–837. <https://doi.org/10.1080/0034340032000128749>

Geurs, K. T., & Ritsema van Eck, J. (2001). Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact. Bilthoven (Netherlands). Retrieved from <https://rivm.openrepository.com/rivm/handle/10029/9487>

Geurs, K. T., & Ritsema van Eck, J. (2003). Evaluation of accessibility impacts of land-use scenarios: the implications of job competition, land-use, and infrastructure developments for the Netherlands. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(1), 69–87. <https://doi.org/10.1068/b12940>

Geurs, K. T., & Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>

Handy, S. L., & Niemeier, D. A. (1997). Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives. *Environment and Planning A*, 29(7), 1175–1194. <https://doi.org/10.1068/a291175>

Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76. <https://doi.org/10.1080/01944365908978307>

Haugen, K., Holm, E., Strömgren, M., Vilhelmson, B., & Westin, K. (2012). Proximity,

accessibility and choice: A matter of taste or condition? *Papers in Regional Science*, 91(1), 65–84. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2011.00374.x>

Ingram, D. R. (1971). The concept of accessibility: A search for an operational form. *Regional Studies*, 5(2), 101–107. <https://doi.org/10.1080/09595237100185131>

Johansson, B., Klaesson, J., & Olsson, M. (2002). Time distances and labor market integration. *Papers in Regional Science*, 81(3), 305–327. <https://doi.org/10.1007/s101100200000>

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM). (2008). Mobiliteitsbalans 2008 Congestie in perspectief. (P. Jorritsma, J. Berveling, L. Harms, J. Kolkman, C. Koopmans, M. Lijesen, ... P. Warffemius, Eds.). Den Haag (the Netherlands). Retrieved from <http://www.kimnet.nl/sites/kimnet.nl/files/mobiliteitsbalans-2008.-congestie-in-perspectief.pdf>

Kwan, M.-P. (2013). Beyond Space (As We Knew It): Toward Temporally Integrated Geographies of Segregation, Health, and Accessibility. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(5), 1078–1086. <https://doi.org/10.1080/00045608.2013.792177>

Levine, J., Merlin, L., & Grengs, J. (2017). Project-level accessibility analysis for land-use planning. *Transport Policy*, 53(August 2016), 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.09.005>

Martínez, L. M., & Viegas, J. M. (2013). A new approach to modelling distance-decay functions for accessibility assessment in transport studies. *Journal of Transport Geography*, 26, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.08.018>

Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2015). Publieksrapportage Rijkswegennet. 3e periode 2014. Den Haag (the Netherlands). Retrieved from <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2015/02/12/publieksrapportage-rijkswegennet>

Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017). Publieksrapportage Rijkswegennet. 3e periode 2016. Publieksrapportage Rijkswegennet. Den Haag (the Netherlands). Retrieved from <file:///C:/Users/borja/Downloads/publieksrapportage-rijkswegennet-jaaroverzicht-2016.pdf>

Morris, J. M., Dumble, P. L., & Wigan, M. R. (1979). Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research Part A: General*, 13(2), 91–109.

[https://doi.org/10.1016/0191-2607\(79\)90012-8](https://doi.org/10.1016/0191-2607(79)90012-8)

Östh, J., Lyhagen, J., & Reggiani, A. (2016). A new way of determining distance decay parameters in spatial interaction models with application to job accessibility analysis in Sweden. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 16(2), 344–363.

Páez, A., Scott, D. M., & Morency, C. (2012). Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators. *Journal of Transport Geography*, 25, 141–153. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016>

Reggiani, A. (1999). *Accessibility, Trade and Location Behaviour*. Ashgate Publishing Limited.

Reggiani, A., Bucci, P., Russo, G., Haas, A., & Nijkamp, P. (2011). Regional labour markets and job accessibility in City Network systems in Germany. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 528–536. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.05.008>

Statistics Netherlands. (2011). *Onderzoek Verplaatsingen in Nederland (OVIN)*. Retrieved October 15, 2014, from <https://www.cbs.nl/nl-nl/onze-diensten/methoden/onderzoeksomschrijvingen/korte-onderzoeksbeschrijvingen/onderzoek-verplaatsingen-in-nederland--ovin-->

Statistics Netherlands. (2015). *Kaart met statistieken per vierkant van 100 bij 100 meter*. Retrieved October 22, 2015, from <http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/themas/dossiers/nederland-regionaal/publicaties/geografische-data/archief/2014/2013-kaart-vierkanten-art.htm>

Statistics Netherlands. (2016). *Statline*. Retrieved February 22, 2015, from <http://statline.cbs.nl/Statweb/>

Stichting LISA. (2015). *Landelijk InformatieSysteem van Arbeidsplaatsen (LISA) 2009-2014*. Retrieved from <https://www.lisa.nl/home>

Sweet, M. N. (2011). Does Traffic Congestion Slow the Economy? *Journal of Planning Literature*, 26(4), 391–404. <https://doi.org/10.1177/0885412211409754>

Thorsen, I., Ubøe, J., & Nævdal, G. (1999). A network approach to commuting. *Journal of Regional Science*, 39(1), 73–101. <https://doi.org/10.1111/1467-9787.00124>

TomTom. (2013). Speed Profiles. Retrieved January 20, 2014, from http://www.tomtom.com/en_gb/licensing/products/traffic/historical-traffic/speed-profiles/#tab:tab1

Weber, J., & Kwan, M.-P. (2002). Bringing time back in : A study on the influence on individual accessibility. *The Professional Geographer*, 54(2), 226–240. <https://doi.org/10.1111/0033-0124.00328>

Weibull, J. W. (1976). An axiomatic approach to the measurement of accessibility. *Regional Science and Urban Economics*, 6, 357–379. [https://doi.org/10.1016/0166-0462\(76\)90031-4](https://doi.org/10.1016/0166-0462(76)90031-4)

Appendix 1. Methodology for determination of the dominant change

To determine what is the dominant effect in every municipality for every day and part of the day, the differences between the relative values of combined effects and partial changes' effects are plotted in a scatterplot. The scatterplot is split by its axis and $\pm 45^\circ$ lines into 8 groups; those groups point out the dominant effect and the consequences. Figure A.1.1. shows the concept of this calculation and classification throughout the A1 and A2 motorways, from the A10 to the corresponding border.

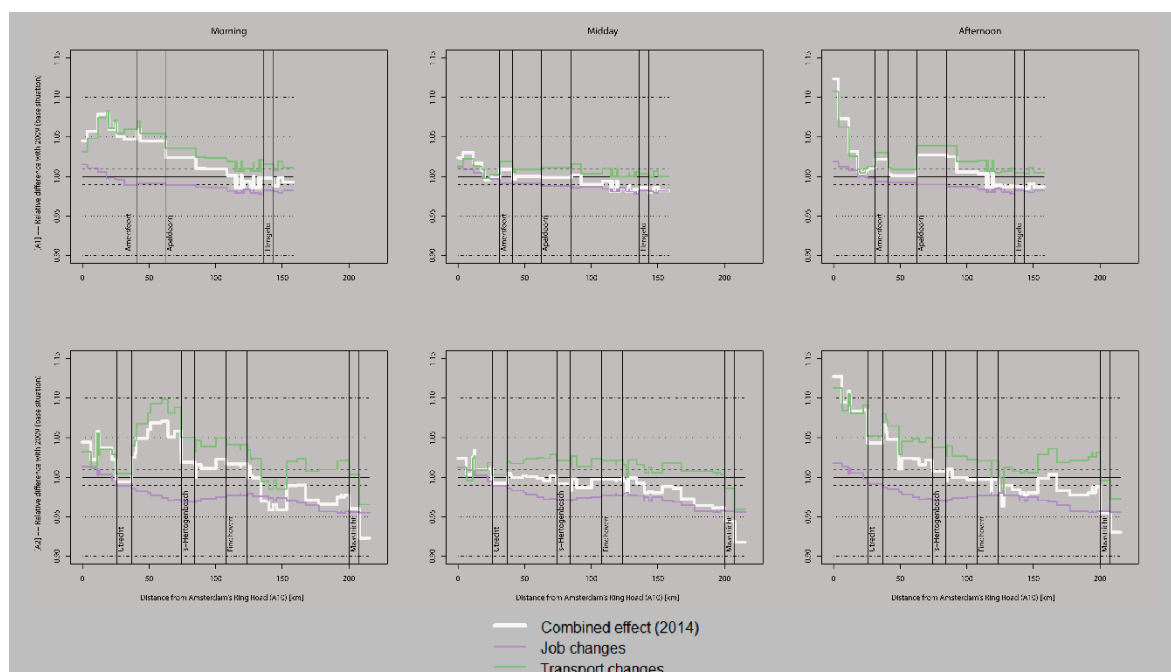


Figure A.1.1: Relative effects of job positions and/or transport changes in job accessibility values throughout the A1 and A2 motorways for Thursday. Base 2009 = 1.

The differences between two pairs of results in relative values are calculated and would be summarized in a point on the scatterplot: the differences between the white line (combined effect) and the purple line (land use changes effect) defines the X coordinate, and the differences between the white line and the green line (transport changes effects) is the Y coordinate. If the difference is much smaller in one pair than in the other, there will be a very dominant effect (the smallest difference); this case is shown in the first kilometres of A1 and A2 during the peak hours, where transport was dominant. If both pairs have same difference, and both are positive or negative, partial effects will obtain the same results, and the combined results will be amplified (positive in some sections close to A10, and negative in the remote sections of A2, beyond Maastricht); otherwise, they will be counteracting (for instance, in 's-Hertogenbosch, the result is no accessibility changes throughout the day). If they are counteracting, any negative difference will mean positive effects on accessibility and vice-versa. Depending on the position of the resulting point in the scatter point, eight possible outcomes are possible, due to the combination of different directions of effects, with four possible combinations (increase/decrease in job density * increase/decrease in travel time), where within these four combinations, there are two subgroups depending on the dominance of the land-use or transport component. The resulting scatter plot of every municipality for Thursday's morning changes is shown in Figure A.1.2.

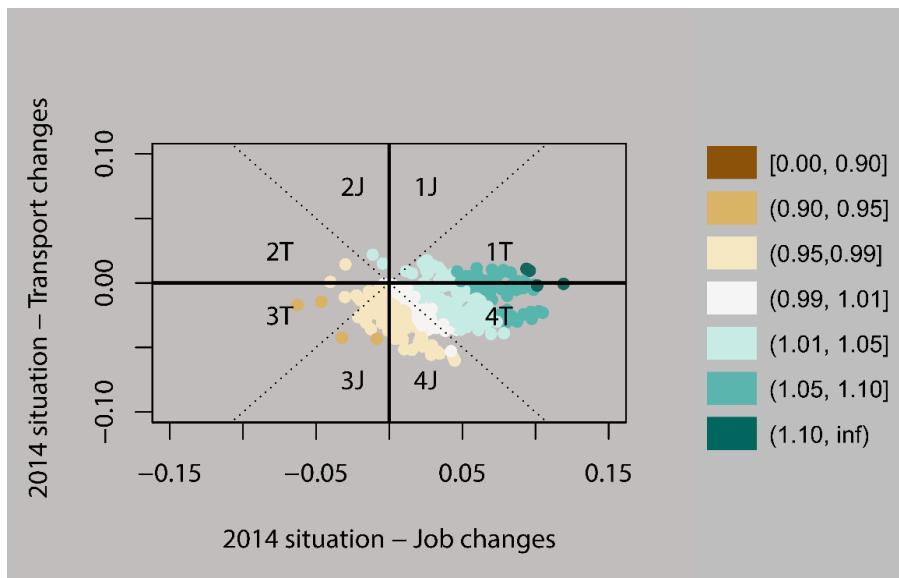


Figure A.1.2: The scatter plot for categorising municipalities according to the main effect of changes and the dominant change. 8 sectors are created using axis and 45° lines. Point colour is the result of combined effect (showed in Figure 6).

Paper 5: Dynamic accessibility using big data: The role of the changing conditions of network congestion and destination attractiveness

Moya-Gómez, B., Salas-Olmedo, M.H., García-Palomares, J.C. and Gutiérrez, J. (2017) Networks and Spatial Economics. <https://doi.org/10.1007/s11067-017-9348-z>

Abstract

Accessibility is essentially a dynamic concept. However, most studies on urban accessibility take a static approach, overlooking the fact that accessibility conditions change dramatically throughout the day. Due to their high spatial and temporal resolution, the new data sources (Big Data) offer new possibilities for the study of accessibility. The aim of this paper is to analyse urban accessibility considering its two components –the performance of the transport network and the attractiveness of the destinations– using a dynamic approach using data from TomTom and Twitter respectively. This allows us to obtain profiles that highlight the daily variations in accessibility in the city of Madrid, and identify the influence of congestion and the changes in location of the population. These profiles reveal significant variations according to transport zones. Each transport zone has its own accessibility profile, and thus its own specific problems, which require solutions that are also specific.

Keywords: Time-sensitive accessibility, urban transport, TomTom, Twitter, Geographic Information Systems (GIS)

1. Introduction

Accessibility is a key concept in urban and regional planning for its capacity to link the activities of people and businesses to the possibilities of reaching them effectively. As Chen et al. (2007) note, "Typically, accessibility refers to the 'ease' of reaching opportunities for activities and services and can be used to evaluate the performance of a transportation and urban system". Accessibility therefore simplifies the relationship between land use and transport, and models the interaction between both systems. Interest in the relationship between transport systems and spatial interaction has grown exponentially, and for more than five decades accessibility analysis has played a key role in the agenda of regional and transport research (Reggiani & Martín, 2011).

Accessibility is a dynamic attribute of locations that varies over time due to changes in the transport network and in the attractiveness of destinations for certain activities. One of the challenges when studying accessibility is to improve the method of introducing the spatial-temporal dimension, and particularly the analysis of daily changes (Geurs et al., 2015; Geurs & Van Wee, 2004; Van Wee, 2016), an issue that has scarcely been addressed until now due to the limitations of traditional data sources. Some works have used these data sources to analyse the effect of congestion on accessibility, considering solely extreme situations (peak and valley times) based on the network (for example, Vandenbulcke et al. 2009; Yiannakoulis et al. 2013), but not the temporal changes in the performance of the infrastructures that occur throughout the day.

Today's new big data sources offer exciting opportunities for the dynamic analysis of accessibility. The information on transport networks has improved conclusively in recent years thanks to the emergence of big data generated by social media, smartphones, Satnav and other technologies (Van Wee, 2016). Navigation companies such as TomTom, NavTeq, Inrix and more; websites like Here, Bing Maps, Google Maps-Google Transit; collaborative projects like Open-Street-Map; and the public availability of Transit Feed Specification (GTFS) data from transit authorities, among others, open up a growing field of research on time-of-day variations in private and public transit accessibility (Geurs, Patuelli, & Dentinho, 2016). These companies and institutions have increasingly detailed systems with plentiful information on the features of roads and public transport networks, and their databases include information on speed variations on the roads and the frequencies of passage in public transport networks, all of which contribute a more efficient and dynamic vision to intraurban accessibility studies.

There is very little research using the new sources in studies on travel times and accessibility. A first group of papers employ data obtained from GPS devices. Møller-Jensen et al. (2012) used GPS logs to calculate speeds, congestion levels and accessibility conditions at three times of day (morning, midday, evening,) in the city of Accra. Dewulf et al. (2015) took Floating Car Data (FCD) from the Be-Mobile system to calculate car travel times. Be-Mobile provides the geolocated positions of 400,000 vehicles equipped with track and trace devices. The travel time measures are further aggregated to produce a generic travel time for peak and off-peak periods. Elsewhere, Owen and Levinson (2015) calculated car accessibility dynamically from data recorded by loop detectors and GPS data.

Other works have studied information from web services to calculate travel times between

origins and destinations. Martin et al. (2008, 2002) incorporated public transport timetable data from a web service to analyse accessibility to hospitals in England. Páez et al. (2013) developed a web-based accessibility instrument using Google Maps API to retrieve information about local amenities (e.g. groceries, restaurants, fitness centres, banks and others) and estimate accessibility by car, walking and cycling. Farber et al. (2014) used General Transit Feed Specification (GTFS) data to calculate dynamic accessibility to food stores by transit. Boisjoly and El-Geneidy (2016) calculated transit accessibility to jobs, accounting for fluctuations in job availability (mobility survey data) and transit service (GTFS data) throughout the day. Jäppinen et al. (2013) used transport information interfaces for Greater Helsinki to analyse improvements in public transport times after a complementary bike sharing system was added to the network.

Of particular interest for this work are the dynamic data from companies that offer daily Speed Profiles with a high spatial and temporal resolution. These companies use crowd-sourcing, Big Data analytics and location technologies to obtain real-time traffic and speed data that leverage current, historical and predictive traffic information across the roadway network. The best-known of these companies is Google, although Inrix and TomTom also provide this type of data. The works published using this type of data sources include particularly those from Toronto by Sweet (2014) and Sweet et al. (2015), who studied the impact of congestion on accessibility and its consequences on company localisation using historic speed data for motorways and major arterial networks provided by Inrix. Elsewhere, Moya-Gómez and García-Palomares (2015) applied data supplied by the TomTom navigation company – specifically the “Speed Profiles” product– to create dynamic maps that reveal the impact of congestion on daily accessibility in the metropolitan area of Madrid. “Speed Profiles” shows the speed on each section of the road network every five minutes. These are historical data obtained from different devices, including the company's own navigators and mobile phone GPS. This new source has so far been underexploited in the study of accessibility.

In addition to network performance, the study of daily accessibility also needs to incorporate the effect of variations in the attractiveness of destinations for certain desired activities. In static accessibility analyses, destination attractiveness is measured through variables such as population or employment. However, dynamic analyses take into account that the destinations' attractiveness changes throughout the day. The population distribution in the city varies at different times of day depending on the type of activities that predominate in each time band (for example, work in the morning, shopping and leisure in mid-afternoon), and can be

analysed from the population's digital footprint every hour of the day and at each point in the city. A dynamic focus must therefore be included in the accessibility analysis, based on activities (where the population is at each time of the day) as a proxy for the destinations' attractiveness. Traditional data sources (censuses) offer information on the spatial distribution of the population at night (place of residence) but not on their location throughout the day. Surveys and travel diaries have also been used to model daily variations in the intensity of use within an urban area (Kaddoura, Kröger, & Nagel, 2016). However, they are extremely time and cost consuming, and therefore scarce, whereas the new data sources allow a dynamic approach to population distribution in the city at a much lower cost. Mobile phone logs –so-called CDR (Call Detail Records)– have been used to map the density of mobile phone activity at different times of the day as an indicator of spatial-temporal changes in the population density in the city (Ratti, Frenchman, Pulselli, & Williams, 2006; Reades, Calabrese, & Ratti, 2009). As the density of calls varies in different time bands and reflects the changes in population densities, each area of the city has its own signature; that is to say, a time profile of mobile phone use, which is very frequent in areas of activity in the central hours of the day, whereas in residential areas it is higher in the afternoon and early evening (Grauwin, Sobolevsky, Moritz, Gódor, & Ratti, 2015; Louail et al., 2014; Reades et al., 2009) .

Social networks also reflect the rhythms of the city. The most widely used data from social networks in urban studies come from Twitter (see Murthy 2013), due to its considerable reach and the fact that the tweets can be downloaded free from the Internet. The densities of tweets sent from each area of the city reveal the population densities (Jiang, Ma, Yin, & Sandberg, 2016). Maps of tweet density can be obtained according to the age, gender and ethnic group of the tweeter, if this information can be inferred from the user identifier (Longley, Adnan, & Lansley, 2015). One approach to the analysis of the daily changes in the population distribution in the city is to map the spatial distribution of the tweets according to the time of day (Ciuccarelli, Lupi, & Simeone, 2014). In addition to the official statistics that show the population's place of residence, the spatial-temporal analysis of tweets is now making it possible to move beyond night-time geographies of residence to see how they compare with daytime activity patterns (Longley et al., 2015).

The spatial-temporal analysis of tweets allows researchers to track users and deduce their mobility patterns (L. Wu, Zhi, Sui, & Liu, 2014), and reveals the spaces where different population groups converge, either based on income bands (Netto, Pinheiro, Meirelles, & Leite, 2015), race (Shelton, Poorthuis, & Zook, 2015) or place of residence (Salas-Olmedo &

Rojas Quezada, 2017). Others analyse the type of space by looking activity type linked to tweets that had been originated in Foursquare (Zhan, Ukkusuri, & Zhu, 2014). The reliability of Twitter data in mobility studies has been validated in the work of Lenormand et al. (2014), who compared the data from Twitter, mobile telephony and official data (censuses), and concluded that the three information sources offer comparable results. However, no research has been found in which these new data sources (mobile telephony, social networks and others) have been used as a proxy for the variability in destinations' attractiveness in the study of dynamic accessibility.

The literature review uncovers very few works that have applied these new data sources to the study of accessibility, and very few that have calculated accessibility in a dynamic way. Those that do, look at the temporal variation in only one component of accessibility, namely network performance. The aim of this paper is to analyse the variations in daily accessibility integrating the time variability of access times and the attractiveness of the destinations. We used the TomTom "Speed Profiles" product to study the variation in travel times (the effect of congestion), which includes the speeds on each roadway section every five minutes. The daily variation in the destinations' attractiveness was studied using geolocated Twitter data. Each message contains the time and the geographic coordinates of the place from which the tweet is sent, along with the user identifier. This enables a map to be created showing the distribution of Twitter users for each transport zone⁹⁶ in the study area every 15 minutes, for use as a proxy for the attractiveness of each zone at each time of day. These data sources are used to make a dynamic study of accessibility, and analyse the influence of each accessibility component (network performance and the attractiveness of the destinations for activities) in each transport zone and at each time of day. The study area is the city of Madrid.

The paper contributes to the literature in several ways. To the best of our knowledge, this is the first time an accessibility analysis has been undertaken using new data sources with global coverage (TomTom and Twitter) considering the two components of accessibility dynamically, namely travel time and destination attractiveness. Accessibility is calculated every 15 minutes, which provides a sequence of high-resolution time maps, instead of several "fixed photos", which are then animated in the form of videos, and the time profile (the signature) of each

⁹⁶ Transport zones typically consider the following criteria: compatibility with other administrative divisions, homogeneity in their land use and/or population composition, correspondence with the natural catchment's area of transport, etc. (Ortúzar & Willumsen, 2011, p. 130). Of them, the internal homogeneity within each zone is of especial interest for our study. Tweeters leave a particular temporal footprint on each land use, thus reflecting the daily variation of the use of each land use. For example, university campuses are very active in the morning, while retail and leisure areas are more active in the evening. The advantage of transport zones over other zones is that they are big enough to contain a representative number of tweeters every 15 minutes while preserving the above-mentioned land use homogeneity, which would become blurred in other zones (i.e. grid cells would contain a land use mixture).

transport zone. Finally, assessment scenarios are built to give an insight into the influence of both accessibility components as they change throughout the course of the day. Our dynamic accessibility approach would benefit recent transportation models dealing with carbon emission estimations (Aziz, Ukkusuri, & Zhan, 2016; Mascia et al., 2016; Yang, Ban, & Ma, 2016), or that aim to describe a city through its transport system (Fielbaum, Jara-Diaz, & Gschwender, 2016).

The article is structured as follows. After this introduction, section 2 describes the data and their pre-processing to obtain the dynamic variables necessary for the calculation of the accessibility indicator. Section 3 presents the accessibility indicator and the assessment scenarios used to analyse dynamic accessibility and differentiate the effects of network congestion and destination attractiveness. Section 4 contains the results of this research, and finally section 5 presents the main conclusions.

2. Study context

Madrid was chosen as the study area for testing the proposed methodology. The metropolitan area of Madrid has a total of 6 million inhabitants and 2.5 million jobs, but the distribution of the population and employment inside the city is very uneven. The city centre is home to 55% of the population, but 65% of the city's jobs. Other differences include a marked contrast between the north of the city –where a substantial proportion of the economic activities have been displaced– and the south, with a distinctly residential nature. As a result of this uneven distribution of population and employment, there is a predominance of flows from the suburbs to the centre and from the south to the north in the early hours of the morning, and from the centre to the suburbs and from north to south in the evening, which has direct consequences on road congestion and accessibility. The inbound radial motorways and the orbital motorways in the north-south direction are congested at the morning peak time, whereas the opposite occurs at the afternoon peak time.

3. Data description and data pre-processing

Two datasets are involved in the accessibility measures presented in this paper: the dataset for the distribution of the attraction factor, and the road network dataset that allows the computation of OD travel times. As our aim is to analyse dynamic accessibility (across the metropolitan area of Madrid), both datasets must have fine spatial and temporal resolutions.

3.1. TomTom Speed Profiles and minimum travel time calculations

This study uses the March 2013 version of TomTom® for the road network, which contains data on historical Speed Profiles for the years 2011 and 2012 obtained from the average journey times reported from users' navigation devices. As the original network is very detailed (it includes accesses to car parks, pedestrian streets, residential streets and country roads), arcs where not much traffic is expected have been omitted. The arcs used in the study are defined by TomTom® as ranging from 0 to 6 in the Functional Road Classification (FRC). The network covers the whole metropolitan area of Madrid and has full connectivity, with a total of 12,935 km (18,235 km one-way arcs), of which 81% have historic Speed Profiles.

Historic Speed Profiles are defined every 5 minutes as a percentage of the free-flow speed of the arc. As a result, the arc of a motorway and a city street may both have the same speed profile but different speeds at the same instant because of their different free-flow speeds. This data structure saves on computational memory and cost and is prepared for use with the GIS software ESRI® ArcGIS. An aggregation of these speed variations every 15 minutes is shown in video 1.

We calculated the travel time per OD pair of transport zones every 15 minutes. This includes the speed variations throughout the journey. Our results were first grouped by start times, which is the only output option of the OD Cost Matrix ArcGIS tool. However, we wanted to group them by end time, i.e. how long an individual must travel in order to reach their destination zone at a certain time. We interpolated these values from the original matrices by splines using the SciPy Python library, as we knew the arrival time and travel time for each OD pair.

3.2. Geolocated tweets and attractiveness of destinations

We chose to use Twitter data as a proxy to estimate the attraction factor of different transport zones in the study area. Table 1 shows the main figures in the dataset of geolocated tweets published between January 2012 and December 2013 in our study area, which is the basis of our research.

	TOTAL
Tweets (all year)	12,408,065
Tweets (published on a Tuesday, Wednesday or Thursday)	5,546,200
Single users in each zone at 15-minute intervals	692,117

Table 1. Geolocated tweets in the Region of Madrid, main figures.

The number of active users in each transport zone at each time of day was calculated using a Geographic Information System (ArcGIS 10.3). The data was treated to convert single tweets into an attraction factor that varies spatially and temporally by first selecting the tweets corresponding to typical working days (i.e. Tuesday to Thursday)⁹⁷, and second, computing a joint spatial (transport zones⁹⁸) and temporal (15-minute period) aggregation in order to obtain the number of single users in each zone at each time of the day (see video 2).

Figure 1 shows the wide variation in active Twitter users throughout the day, with a clear minimum in the central hours of the night and a maximum between 8 pm and 10 pm. The night hours when the population is not engaged in any activity are of no interest from the point of view of accessibility analysis. The period between midnight and 7 am was thus discarded, which in Madrid tends to correspond to the period of night-time rest. Between 7 am and midnight there is an uneven distribution of active tweeters, although the size of the population remains the same (approximately); the individuals simply move from some places to others within the metropolitan area. We therefore opted to normalise the data on active tweeters in units per 100,000 to obtain a proxy for the spatial distribution of the population according to the place they are tweeting from throughout the day, in order to estimate the attractiveness of each transport zone in the accessibility analysis. The greater the size of the population in a transport zone, the greater its attractiveness at that time of day.

⁹⁷ Longley et al. (2015) report that these three days of the week have a very similar tweet profile, and represent the average working day, while Monday and Friday have specific profiles influenced by the proximity of Sunday and Saturday respectively.

⁹⁸ This study uses Madrid official transport zones delimitation, which follows the criteria explained in previous footnote 1. There are 1,171 transport zones in the study area.

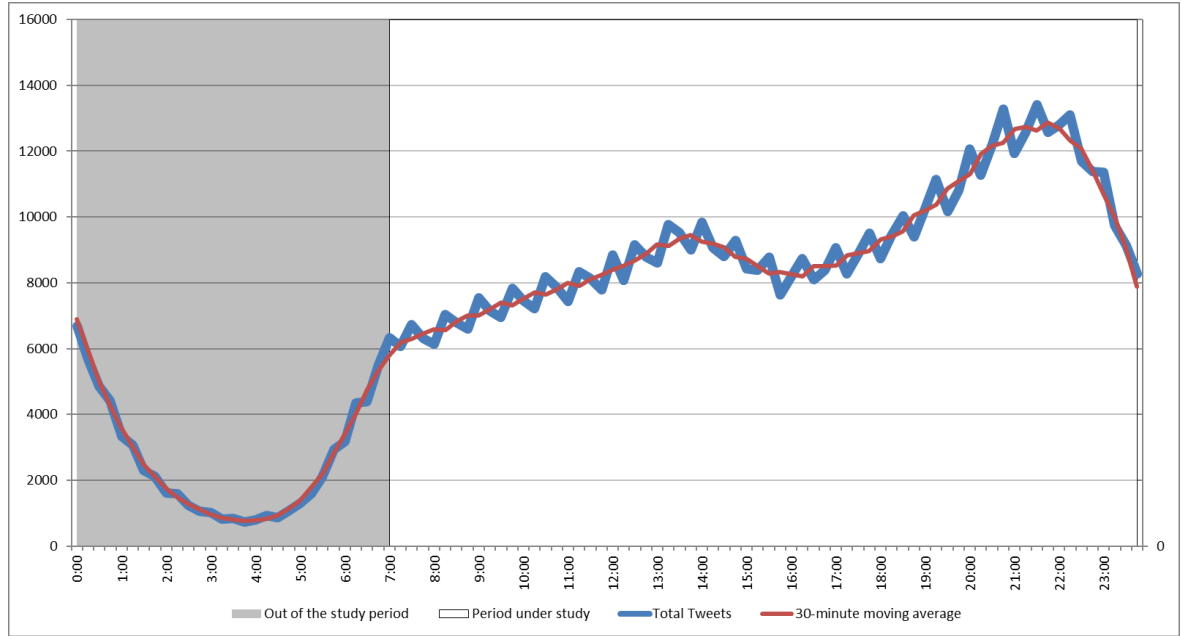


Figure 1: Number of active tweeters throughout the day in the metropolitan area of Madrid.

4. Methods

4.1. Accessibility calculations

The dynamic approach proposed in this paper involves calculating the accessibility of each transport zone every 15 minutes based on the spatial distribution of the population (normalised number of tweeters) in that quarter hour, and the travel times between each OD pair according to the arrival time at the destination transport zone. This is done by using the potential accessibility indicator, which shows the spatial interaction between a specific origin and all the destinations taking into consideration the degree of attractiveness of each destination, the cost of travel and the distance decay, i.e., how fast the interaction drops as the transport cost increases (Reggiani, Bucci, & Russo, 2011b). Since it is generally agreed that exponential functions are more appropriate for analysing short distance interactions such as those occurring within urban areas (Bruno & Genovese, 2012), we computed the potential accessibility using an exponential function according to the following formula:

$$P_{it} = \sum_{j=1}^n M_{jt} \cdot e^{\alpha \cdot C_{ijt}^*} \quad (1)$$

Where P_{it} is the potential accessibility of transport zone i at time t , M_{jt} is the normalized number of tweets in transport zone j at time t , C_{ijt}^* is the travel time through the road network between

transport zones i and j at time t , and α is a parameter indicating the distance decay. In this case, we calibrated α using the Hyman algorithm (Ortúzar & Willumsen, 2011, p. 192) with the 2004 Region of Madrid Mobility Survey. The resulting parameter was -0.12957849.

To determine the self-potential, the internal transport zone times were calculated as the average minimum travel time between 10% of the randomly chosen network junctions to their centroid zone.

Finally, we added half the travel time of the origin/destination zone to each journey. So C_{ijt}^* was calculated according to:

$$C_{ijt}^* = \frac{1}{2}C_{ii} + C_{ijt} + \frac{1}{2}C_{jj} \quad (2)$$

To isolate the effect of each accessibility component (ease of access via the network and destination attractiveness) on dynamic accessibility, this indicator was calculated for each scenario described in subsection 4.2. Given that the approach taken in this research requires numerous accessibility calculations (depending on the scenarios and times of day), this indicator was integrated in a single ArcGIS toolbox in order to facilitate its computation.

4.2. Scenarios

Four scenarios were considered for the analysis of dynamic accessibility and the influence of its different components (travel time and destination attractiveness):

- a) Reference scenario.- Accessibility is calculated based on average travel times and the average spatial distribution of the tweeters throughout the day. This is therefore a static scenario that is taken as a reference to assess the changes that occur throughout the day based on the temporal variations in congestion and the spatial distribution of the population within the metropolitan area.
- b) Dynamic accessibility scenario.- Accessibility is calculated every 15 minutes taking into account the variability in congestion and the spatial distribution of the tweeters.
- c) Dynamic congestion scenario.- Accessibility is calculated every 15 minutes considering the variation in congestion levels, while the population distribution remains static (average spatial distribution of the tweeters throughout the day). This makes it possible to isolate the effect of the variation in congestion levels on accessibility.

- d) Dynamic attractiveness scenario.- Accessibility is calculated every 15 minutes, but in this case only the variation in the population distribution is considered dynamic, whereas congestion remains static (average travel times).

The dynamic accessibility analysis is compared with the reference scenario to identify the differences (according to the times of day) produced by the dynamic approach compared to the static approach. The dynamic congestion and attractiveness scenarios highlight the influence of each of these two components on dynamic accessibility.

5. Results

Figure 2 shows the temporal pattern of average accessibility values for the whole of the metropolitan area of Madrid according to journey arrival times and scenarios. The reference scenario has an average value of around 6,200 potential units and represents the average accessibility throughout the day. The curve for the dynamic accessibility scenario is substantially higher than this average value in the early hours of the morning (between 7 and 7:30 am) and from 6:30 pm, revealing a higher than average accessibility in this time band. In contrast, it is clearly below the average for the static scenario between 7:30 am and 6:30 pm, and particularly around 8:30 and 9:30 am and between 3 and 6 pm.

The pattern of dynamic accessibility depends on the joint action of the changes in congestion and population distribution throughout the day. The curves for the dynamic congestion and attractiveness scenarios generally show opposing behaviours. If the population distribution remains fixed (dynamic congestion scenario), two clear times with lower accessibility can be observed, corresponding to the morning and afternoon peaks (high levels of congestion due to travel to and from work), whereas after 9 pm accessibility is maximum (free flow). When congestion levels remain fixed (dynamic attractiveness scenario), accessibility is above average until 7:30 pm (except at lunchtime), when the population is concentrated in the centre (the most easily accessible space), but it falls below average at the end of the day when the population tends to disperse around residential areas in the suburbs (less accessible than the centre).

Therefore, the dynamics for congestion and destination attractiveness represent opposing forces that tend to offset each other. For example, in the early hours of the morning the population is concentrated in the centre (which increases accessibility), but congestion levels are high (which reduces accessibility). This means that the dynamic accessibility curve is

almost always located between the curves for the dynamic congestion and attractiveness scenarios, although the fact that it is located closer to the first than the second indicates that the variation in congestion outweighs the variation in destination attractiveness. In fact, the lowest dynamic accessibility values occur at the morning and afternoon peak times, although this is when the population tends to be concentrated in the centre (see also Table 3).

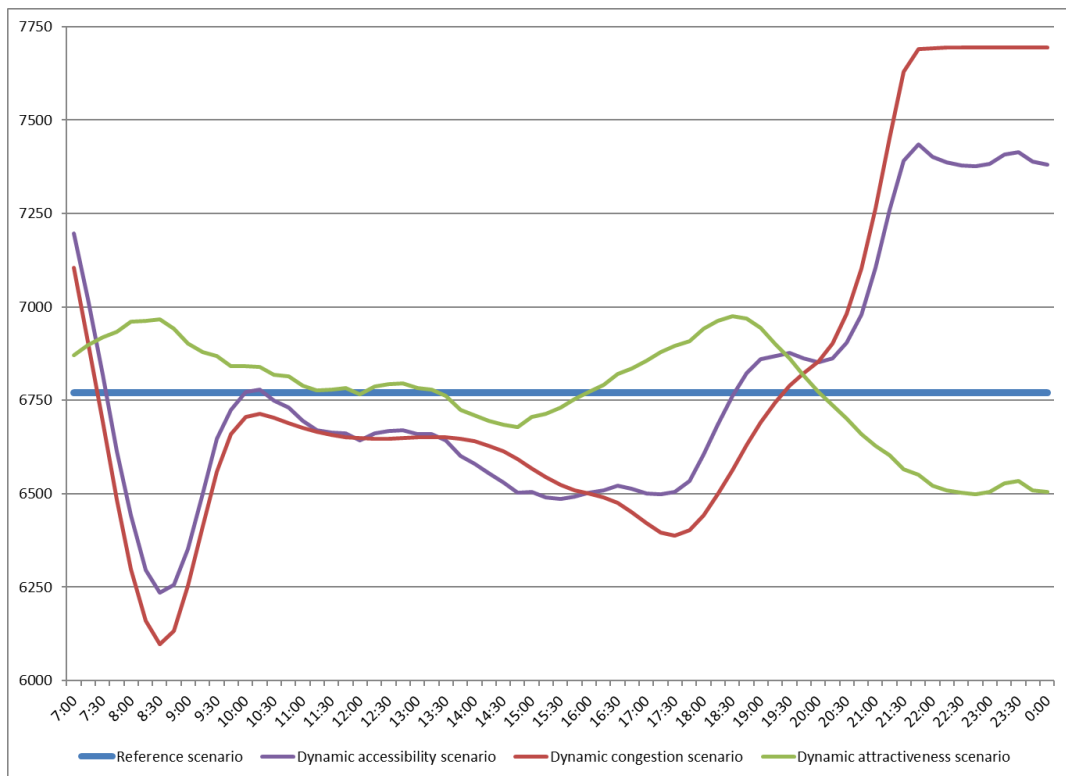


Figure 2: Changes in average accessibility every 15 mins according to scenarios.

In general terms the average values of each scenario reveal the pattern of dynamic accessibility and the role played by the two dynamic variables (network congestion and destination attractiveness) in the whole of the metropolitan area of Madrid, taking the reference scenario as the element for comparison. However, this general pattern conceals major differences in the profiles of the different transport zones. As it is impossible to analyse the profiles of each zone, we have selected three that have locations and features that are representative of the internal discrepancies in the metropolitan area: *a)* a residential city in the suburban south *b)* the city centre; *c)* an area of activity in the north (the headquarters of the multinational company Telefónica); and (Figure 3). In the reference scenario, the accessibility values for the second zone (centre) are substantially higher than the average for the metropolitan area (almost 10,000 units), intermediate (5,000) in the third (north), and far below

average (4,400) in the first (south). The curves for temporal changes in dynamic accessibility are very different:

a) The residential city in the metropolitan south reveals a very marked decline in accessibility due to the effects of congestion at the morning peak time (Figure 3a) when there is a predominance of journeys from the suburbs to the centre. Unlike the general profile for the metropolitan area, the dynamic population distribution at the morning and evening peak times does not tend to offset the loss of accessibility due to congestion but instead reinforces it, as the city loses population during these periods owing to its residential character. In the central hours of the day this space suffers barely any congestion, and the dynamic accessibility is similar to that of the reference scenario.

b) The central transport zone is not affected by congestion in the early hours of the morning when there is a predominance of inbound journeys, so its dynamic accessibility is higher than the static average in this time period (Figure 3b). However, it is significantly affected by congestion in the central hours of the day and particularly at the afternoon peak time, when the population begins to leave the centre to travel to the suburbs. The curve for the dynamic attractiveness scenario is significantly higher than the reference scenario in both the morning and afternoon, as the centre contains a substantial proportion of the population at these times.

c) Finally, the area of economic activity in the north of the city is very sensitive to congestion at the afternoon peak time (Figure 3c), coinciding with the time people leave work. Dynamic accessibility is higher than static accessibility during the morning (until 2:30 pm), which is explained by the population concentration and the alleviation of congestion in the outbound journeys. At night the dynamic accessibility is higher than the static average in all three spaces.

In short, the dynamic accessibility profiles in the three transport zones are the result of the interplay of the opposing forces of the congestion dynamic and population density. In the centre, the population concentration and the low congestion in the early hours of the morning combine to create a situation of greater accessibility. At the end of the afternoon, the high population concentration counteracts the impact of congestion. However, during the central hours of the day, the population concentration does not offset the effects of road congestion. This situation is repeated in the north, where the high population concentration compensates for the effects of congestion in the morning, but not in the afternoon peak time. In the residential

area in the metropolitan south, the population dynamic is more stable than in the two previous zones, though the dynamic accessibility profile is more similar to that of the dynamic congestion scenario. The most important finding is that the population dynamic reinforces (rather than offsets) the effects of network congestion, reducing dynamic accessibility at the morning and afternoon peak times and increasing it at the end of the day.

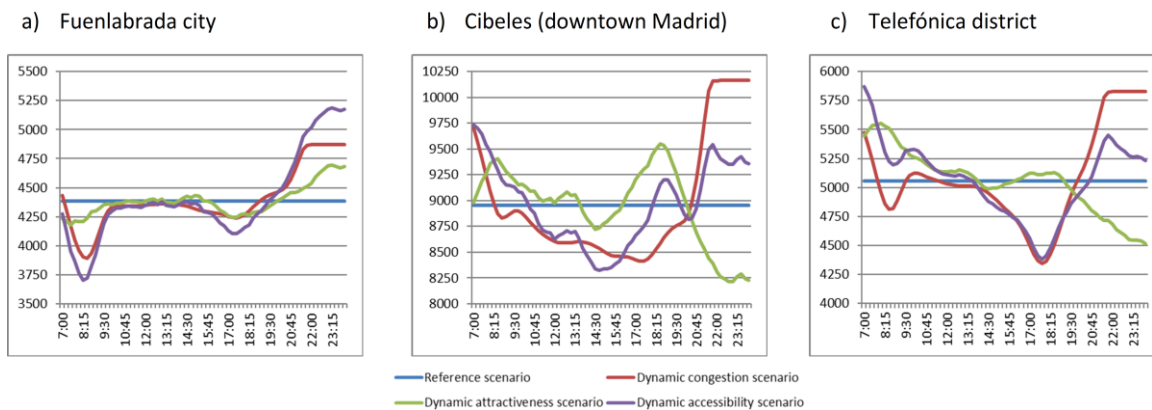


Figure 3: Profile for changes in accessibility according to scenarios (every 15 mins) in three representative transport zones in the metropolitan area of Madrid.

Another way of analysing the variability in dynamic accessibility according to transport zones is to map the differences between the assessment scenarios and the reference scenario in each zone at several times of day. In the reference scenario (Figure 4) the spatial distribution of accessibility shows a characteristic centre-suburban pattern. The highest accessibility is recorded in the central transport zones with a high land-use intensity (concentration of activities and/or population), whereas in the suburbs the accessibility values are much lower. However, the spatial distribution varies throughout the day. To analyse the dynamic scenarios in detail, three times were selected, corresponding to the morning peak time, the morning valley, and the afternoon peak time. To observe the differences more clearly, each of the dynamic scenarios is compared to the reference scenario at those three times (Figure 5). Additionally, three videos have been produced showing these differences throughout the full day (videos 3 to 5).

The comparison between the dynamic congestion scenario and the reference scenario (Figure 5a and video 3) shows very marked differences for the journeys that reach their destination at 8:30 am (maximum congestion), less marked at 5:30 pm (start of the afternoon peak time) and practically non-existent at midday (average congestion). These results are consistent with the curves in Figure 1 and with Tables 2 and 3, but they raise some further considerations that are

worth exploring. The transport zones in the south, east and west register the greatest negative differences in accessibility in the morning peak, whereas the situation improves in the centre and north, which concentrate a large proportion of employment, and where there is therefore a predominance of inbound rather than outbound journeys at that time of day. Practically the opposite situation occurs at the start of the afternoon peak time: the greatest negative differences correspond to the centre and particularly the north. The flows are now reversed compared to the morning, and these areas that concentrate a large volume of employment now begin to register high congestion in outbound journeys.

The comparison between the dynamic attractiveness scenario and the reference scenario (Figure 5b and video 4) reveals significant differences at 8:30 am, but in the positive sense. The increase in population density in the centre and north causes an increase in accessibility in these areas, which contain a high concentration of jobs.

The dynamic accessibility scenario is the result of the joint effect of the changes in network congestion and the attractiveness of the destinations, with a much greater influence of the first than the second (Figure 5c and video 5). In fact, Figures 5a and 5c are very similar. The most important difference is the reinforcement of the effects of network performance and population concentration in the city centre at the morning peak time. The general resulting sequence can be seen in the vide 5 and reveals how the southern, eastern and western zones are the most negatively affected at the morning peak time, whereas the areas in the centre and north are most adversely affected during the afternoon peak, essentially due to the effects of congestion.

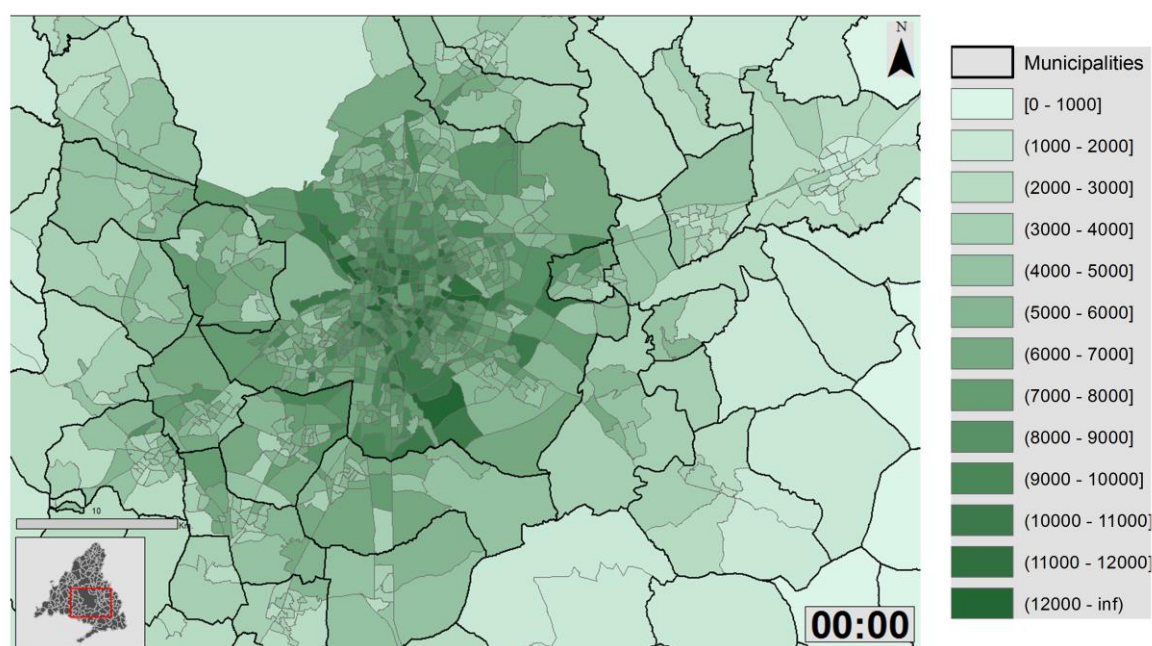


Figure 4: Spatial distribution of accessibility in the reference scenario (network congestion and destination attractiveness remain static).

Finally, the coefficient of variation in accessibility between transport zones and within each transport zone was calculated in each scenario. The aim of the first is to analyse the spatial variability between transport zones and identify the times and scenarios with the most homogeneous distribution, while the second identifies the temporal variability in accessibility in each transport zone in order to differentiate the transport zones that have a greater temporal stability from those that have greater variability.

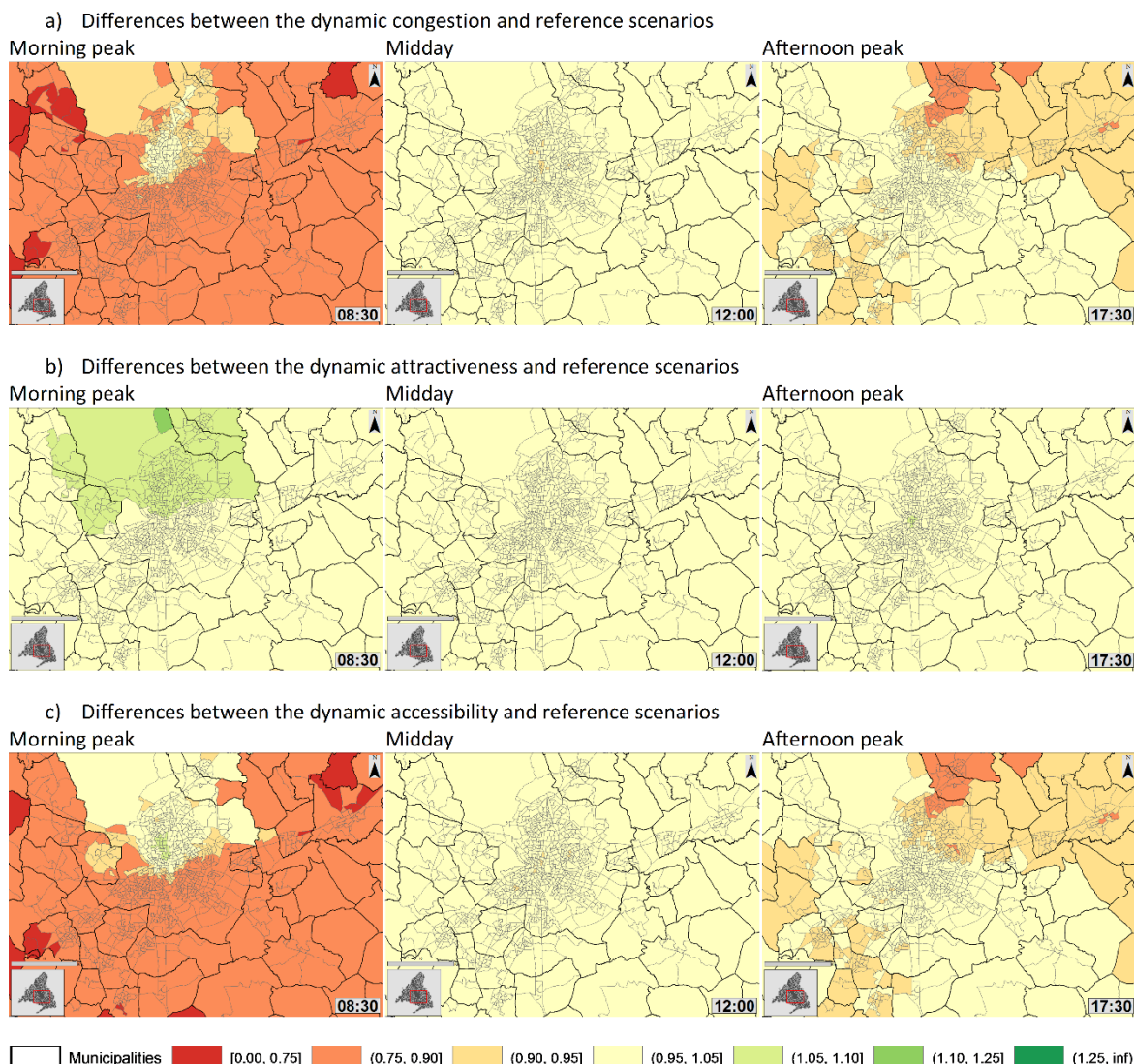


Figure 5: Differences between the dynamic scenarios and the reference scenario.

Tables 2 and 3 show the descriptive statistics for accessibility in the static and dynamic scenarios respectively. To facilitate comparison between the dynamic scenarios and the reference scenario, the differences were calculated between the values in each scenario and the reference scenario and expressed in the form of ratios. At the morning peak time the discrepancies in accessibility in both congestion and population distribution increase compared to the reference scenario (ratios of 1.09 and 1.03, respectively), producing a 9% and 3% higher coefficient of variation (variability between transport zones) in these dynamic scenarios than in the reference scenario. Figure 5 shows that the more suburban areas with poorer accessibility suffer greater effects of congestion at this time, while the central areas (centre-north) benefit from an increase in population. Both effects are self-reinforcing and lead

to a considerable increase in inequalities in the dynamic accessibility scenario compared to the reference scenario (ratio of 1:13).

At the start of the afternoon peak time the increase in the discrepancies between the dynamic accessibility scenario and the reference scenario is weak (ratio of 1:03), owing to the concentration of activities (ratio of 1.03) rather than to congestion (ratio of 1.00), whereas at midday the reduction in congestion (ratio 0.98) also produces a decrease in the discrepancies in dynamic accessibility (0.98).

Accessibility values	
Number of transport zones	1,010
Min	325.42
Max	13,840.83
Mean	6,771.15
SD	2,772.49
CV	40.95

Table 2: Descriptive statistics of accessibility in the reference scenario.

Figure 6 shows the temporal variability in accessibility in each transport zone in the dynamic scenarios. In the dynamic accessibility scenario (Figure 6c), the centre, and the north to a minor degree, present the lowest variation coefficients. Once again this distribution is a result of the interplay between the network congestion dynamic and the destination attractiveness dynamic. Congestion generates more uneven accessibility profiles (Figure 6a), and has a greater effect on the more suburban areas. The population density dynamic has less effect on the daily variation in accessibility in each zone (Figure 6b), but more in the centre and north of the city.

Dynamic congestion scenario						
	Accessibility			Differences (dynamic congestion scenario/reference scenario)		
	Morning peak	Midday	Afternoon peak	Morning peak	Midday	Afternoon peak
Min	276.74	325.21	316.93	0.85	1.00	0.97
Max	12 876.25	13 763.07	13 321.02	0.93	0.99	0.96
Mean	6 096.54	6 648.37	6 387.61	0.90	0.98	0.94
SD	2 732.87	2 669.58	2 618.75	0.99	0.96	0.94
CV	44.83	40.15	41.00	1.09	0.98	1.00

Dynamic attractiveness scenario						
	Accessibility			Differences (dynamic attractiveness scenario/reference scenario)		
	Morning peak	Midday	Afternoon peak	Morning peak	Midday	Afternoon peak
Min	303.20	321.25	322.71	0.93	0.99	0.99
Max	14 201.09	13 698.87	14 252.53	1.03	0.99	1.03
Mean	6 967.31	6 765.65	6 894.79	1.03	1.00	1.02
SD	2 929.16	2 758.65	2 912.05	1.06	1.00	1.05
CV	42.04	40.77	42.24	1.03	1.00	1.03
Dynamic accessibility scenario						
	Accessibility			Differences (dynamic accessibility scenario/reference scenario)		
	Morning peak	Midday	Afternoon peak	Morning peak	Midday	Afternoon peak
Min	253.70	321.07	314.28	0.78	0.99	0.97
Max	13 227.94	13 622.12	13 592.18	0.96	0.98	0.98
Mean	6 235.76	6 643.06	6 504.96	0.92	0.98	0.96
SD	2 892.88	2 654.65	2 753.08	1.04	0.96	0.99
CV	46.39	39.96	42.32	1.13	0.98	1.03

Table 3. Descriptive statistics of accessibility in the dynamic scenarios.

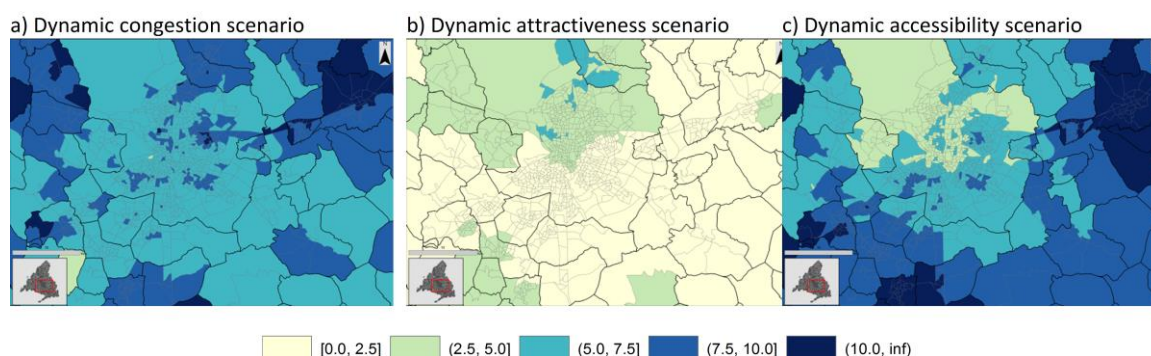


Figure 6: Coefficient of variation in accessibility distribution profiles (every 15 minutes) according to transport zones and scenarios.

6. Conclusions

The new data sources offer new possibilities for the dynamic analysis of accessibility. The recent availability of traffic data from commercial navigation companies (TomTom, Nokia Here, Garmin), and as (limited) open data (Google), is a genuine leap forwards for the study of dynamic travel times. In addition, data on people's location during the day is becoming more spatially and temporally disaggregated, thus contributing to greater detail in the land-use

aspect of accessibility measures. For example, geolocated tweets can be downloaded free of charge and used to map the intensity of use of each part of the city during the day.

In this research we have used the increasing availability of big data to overcome the temporal restrictions of previous studies at the urban scale. We consider the two components of accessibility dynamically: travel times to reach the destinations, and the attractiveness of the destinations themselves. For the first we use data from the TomTom company, which provides travel times for each section of the network in 15-minute intervals. For the second we use the number of active tweeters in each transport zone in 15 minute intervals as a proxy. These data highlight the variation in the spatial distribution of the population depending on the time of day, and show that it tends to be concentrated in the centre in the morning and afternoon and in residential areas in the suburbs at night.

The results of the dynamic accessibility analyses reveal that in general the poorest accessibility conditions are recorded at the morning and afternoon peak times due to the increase in congestion, although its effects are partially offset by the distribution of the population density, which increases in the city centre at these times. As expected, the best accessibility conditions occur at night in a situation of free flow, although the population tends to be dispersed throughout the suburbs.

These general results conceal marked contrasts between transport areas. The distribution of accessibility in the reference scenario shows a typical accessibility gradient between the centre and the suburbs in an average congestion scenario and an average distribution of population densities. However, these accessibility conditions change significantly depending on the time of day. At the morning peak time the greatest decrease in accessibility occurs in suburban residential zones, as the predominance of inbound travel causes serious problems of congestion, while the population tends to be concentrated in the centre. In contrast, at the afternoon peak time the transport zones in the centre and north, which contain the highest proportion of jobs, are the most negatively affected by the effects of congestion, at a time when outbound journeys predominate. The calculation of the coefficients of variation of the profiles of each transport zone shows that in general the transport zones in the suburbs register a greater temporal variation in their accessibility conditions.

Dynamics of accessibility throughout the day give policymakers greater insight into accessibility issues that are otherwise masked in static accessibility analyses. Accessibility conditions change throughout the day, as do the causes of these changes, namely congestion

in the road network and the population distribution in the city. Each transport zone has its own accessibility profile, and thus its own specific problems, which require solutions that are also specific.

This research also represents a further step forward for accessibility analyses by considering the two accessibility components dynamically and determining which one has the greatest impact in each transport zone and at each time of day. However, the work has certain limitations that can be overcome in future research. The analysis of geolocated tweets shows that, as expected, the density of tweeters varies considerably throughout the day, increasing in areas of activity during the daytime and in residential areas at night. However, Twitter is a fairly biased source and is possibly not the most effective for use as a proxy for the variation in population density throughout the day. In future work we will use data from more reliable sources than Twitter –specifically mobile phone data– to consider the time variation in the available activities. The analysis of dynamic accessibility in public transport is beyond the scope of this research, but it will be examined in the future using data from Google Transit and mobile phones.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge funding from the ICT Theme of the European Union's Seventh Framework Programme (INSIGHT project - Innovative Policy Modelling and Governance Tools for Sustainable Post-Crisis Urban Development, GA 611307), the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and the European Regional Development Fund (TRA2015-65283-R and FPD1 2013/17001), and the Madrid Regional Government (SOCIALBIGDATA-CM, S2015/HUM-3427).

References

- Aziz, H. M. A., Ukkusuri, S. V., & Zhan, X. (2016). Determining the Impact of Personal Mobility Carbon Allowance Schemes in Transportation Networks. *Networks and Spatial Economics*. <http://doi.org/10.1007/s11067-016-9334-x>
- Boisjoly, G., & El-Geneidy, A. (2016). Daily fluctuations in transit and job availability: A comparative assessment of time-sensitive accessibility measures. *Journal of Transport Geography*, 52, 73–81. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.03.004>

- Bruno, G., & Genovese, A. (2012). A Spatial Interaction Model for the Representation of the Mobility of University Students on the Italian Territory. *Networks and Spatial Economics*, 12(1), 41–57. <http://doi.org/10.1007/s11067-010-9142-7>
- Chen, A., Yang, C., Kongsomsaksakul, S., & Lee, M. (2007). Network-based accessibility measures for vulnerability analysis of degradable transportation networks. *Networks and Spatial Economics*, 7(3), 241–256. <http://doi.org/10.1007/s11067-006-9012-5>
- Ciuccarelli, P., Lupi, G., & Simeone, L. (2014). Visualizing the Data City. (B. Pernici, S. Della Torre, B. M. Colosimo, T. Faravelli, R. Paolucci, & S. Piardi, Eds.) (First). Cham: Springer International Publishing. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-02195-9>
- Dewulf, B., Neutens, T., Vanlommel, M., Logghe, S., De Maeyer, P., Witlox, F., ... Van de Weghe, N. (2015). Examining commuting patterns using Floating Car Data and circular statistics: Exploring the use of new methods and visualizations to study travel times. *Journal of Transport Geography*, 48(December), 41–51. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.08.006>
- Farber, S., Morang, M. Z., & Widener, M. J. (2014). Temporal variability in transit-based accessibility to supermarkets. *Applied Geography*, 53, 149–159. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.012>
- Fielbaum, A., Jara-Diaz, S., & Gschwender, A. (2016). A Parametric Description of Cities for the Normative Analysis of Transport Systems. *Networks and Spatial Economics*. <http://doi.org/10.1007/s11067-016-9329-7>
- Geurs, K. T., De Montis, A., & Reggiani, A. (2015). Recent advances and applications in accessibility modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, 82–85. <http://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.09.003>
- Geurs, K. T., Patuelli, R., & Dentinho, T. P. (2016). Accessibility, Equity and Efficiency: Challenges for Transport and Public Services. (K. T. Geurs, R. Patuelli, & T. P. Dentinho, Eds.). Edward Elgar Publishing Limited.
- Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>

Grauwin, S., Sobolevsky, S., Moritz, S., Gódor, I., & Ratti, C. (2015). Towards a comparative science of cities: using mobile traffic records in New York, London, and Hong Kong. In M. Helbich, J. Jokar Arsanjani, & M. Leitner (Eds.), *Computational approaches for urban environments* (First, pp. 363–387). Springer International Publishing. Retrieved from <http://www.springer.com/gb/book/9783319114682>

Jäppinen, S., Toivonen, T., & Salonen, M. (2013). Modelling the potential effect of shared bicycles on public transport travel times in Greater Helsinki: An open data approach. *Applied Geography*, 43, 13–24. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.05.010>

Jiang, B., Ma, D., Yin, J., & Sandberg, M. (2016). Spatial Distribution of City Tweets and Their Densities. *Geographical Analysis*, 48(3), 337–351. <http://doi.org/10.1111/gean.12096>

Kaddoura, I., Kröger, L., & Nagel, K. (2016). User-specific and Dynamic Internalization of Road Traffic Noise Exposures. *Networks and Spatial Economics*, 1–20. <http://doi.org/10.1007/s11067-016-9321-2>

Lenormand, M., Picornell, M., Cantú-Ros, O. G., Tugores, A., Louail, T., Herranz, R., ... Ramasco, J. J. (2014). Cross-checking different sources of mobility information. *PLoS ONE*, 9(8), 30–38. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0105184>

Longley, P. A., Adnan, M., & Lansley, G. (2015). The geotemporal demographics of twitter usage. *Environment and Planning A*, 47(2), 465–484. <http://doi.org/10.1068/a130122p>

Louail, T., Lenormand, M., García, O., Picornell, M., Herranz, R., Frías-Martínez, E., ... Barthelemy, M. (2014). From mobile phone data to the spatial structure of cities. *Scientific Reports*, 4, 5276. <http://doi.org/10.1038/srep05276>

Martin, D., Jordan, H., & Roderick, P. (2008). Taking the Bus: Incorporating Public Transport Timetable Data into Health Care Accessibility Modelling. *Environment and Planning A*, 40(10), 2510–2525. <http://doi.org/10.1068/a4024>

Martin, D., Wrigley, H., Barnett, S., & Roderick, P. (2002). Increasing the sophistication of access measurement in a rural healthcare study. *Health and Place*, 8(1), 3–13. [http://doi.org/10.1016/S1353-8292\(01\)00031-4](http://doi.org/10.1016/S1353-8292(01)00031-4)

Mascia, M., Hu, S., Han, K., North, R., van Poppel, M., Theunis, J., ... Litzenberger, M. (2016).

Impact of Traffic Management on Black Carbon Emissions: a Microsimulation Study. *Networks and Spatial Economics*, 1–23. <http://doi.org/10.1007/s11067-016-9326-x>

Møller-Jensen, L., Kofie, R. Y., & Allotey, A. N. M. (2012). Measuring accessibility and congestion in Accra. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 66(1), 52–60. <http://doi.org/10.1080/00291951.2011.644322>

Moya-Gómez, B., & García-Palomares, J. C. (2015). Working with the daily variation in infrastructure performance on territorial accessibility. The cases of Madrid and Barcelona. *European Transport Research Review*, 7(2), 1–13. <http://doi.org/10.1007/s12544-015-0168-2>

Murthy, D. (2013). *Twitter: Social Communication in Twitter Age (First)*. Cambridge (United Kingdom): John Wiley & Sons.

Netto, V. M., Pinheiro, M., Meirelles, J. V., & Leite, H. (2015). Digital footprints in the cityscape: Finding networks of segregation through Big Data. In *International Conference on Location-Based Social Media Data* (pp. 1–15). Athens (United States of America).

Ortúzar, J. D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport* (4th ed.). West Sussex (United Kingdom): John Wiley & Sons. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=410941>

Owen, A., & Levinson, D. M. (2015). Modeling the commute mode share of transit using continuous accessibility to jobs. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 74, 110–122. <http://doi.org/10.1016/j.tra.2015.02.002>

Páez, A., Moniruzzaman, M., Bourbonnais, P. L., & Morency, C. (2013). Developing a web-based accessibility calculator prototype for the Greater Montreal Area. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 58, 103–115. <http://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.020>

Ratti, C., Frenchman, D., Pulselli, R. M., & Williams, S. (2006). Mobile landscapes: Using location data from cell phones for urban analysis. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5), 727–748. <http://doi.org/10.1068/b32047>

Reades, J., Calabrese, F., & Ratti, C. (2009). Eigenplaces: Analysing cities using the space - Time structure of the mobile phone network. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(5), 824–836. <http://doi.org/10.1068/b34133t>

Reggiani, A., Bucci, P., & Russo, G. (2011). Accessibility and Network Structures in the German Commuting. *Networks and Spatial Economics*, 11(4), 621–641. <http://doi.org/10.1007/s11067-010-9149-0>

Reggiani, A., & Martín, J. C. (2011). Guest Editorial: New Frontiers in Accessibility Modelling: An Introduction. *Networks and Spatial Economics*, 11(4), 577–580. <http://doi.org/10.1007/s11067-011-9155-x>

Salas-Olmedo, M. H., & Rojas-Quezada, C. (2016). Mapping mobility patterns to public spaces in a medium-sized city using geolocated tweets. *arXiv, Physics and Society*, 10, 1. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1608.02364>

Shelton, T., Poorthuis, A., & Zook, M. (2015). Social media and the city: Rethinking urban socio-spatial inequality using user-generated geographic information. *Landscape and Urban Planning*, 142, 198–211. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.020>

Sweet, M. N. (2014). Do firms flee traffic congestion? *Journal of Transport Geography*, 35, 40–49. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.01.005>

Sweet, M. N., Harrison, C. J., & Kanaroglou, P. S. (2015). Gridlock in the Greater Toronto Area: Its geography and intensity during key periods. *Applied Geography*, 58, 167–178. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.011>

van Wee, B. (2016). Accessible accessibility research challenges. *Journal of Transport Geography*, 51, 9–16. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018>

Vandenbulcke, G., Steenberghe, T., & Thomas, I. (2009). Mapping accessibility in Belgium: A tool for land-use and transport planning? *Journal of Transport Geography*, 17(1), 39–53. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008>

Wu, L., Zhi, Y., Sui, Z., & Liu, Y. (2014). Intra-urban human mobility and activity transition: Evidence from social media check-in data. *PLoS ONE*, 9(5). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0097010>

Yang, X., Ban, X. J., & Ma, R. (2016). Mixed Equilibria with Common Constraints on Transportation Networks. *Networks and Spatial Economics*. <http://doi.org/10.1007/s11067-016-9335-9>

Yiannakoulias, N., Bland, W., & Svenson, L. W. (2013). Estimating the effect of turn penalties and traffic congestion on measuring spatial accessibility to primary health care. *Applied Geography*, 39, 172–182. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.003>

Zhan, X., Ukkusuri, S. V., & Zhu, F. (2014). Inferring Urban Land Use Using Large-Scale Social Media Check-in Data. *Networks and Spatial Economics*, 14(3–4), 647–667. <http://doi.org/10.1007/s11067-014-9264-4>

Supplemental material

Video 1: <https://goo.gl/IT2LTq>

Video 2: <https://goo.gl/tFIPMw>

Video 3: <https://goo.gl/rDmS25>

Video 4: <https://goo.gl/8lqe7M>

Video 5: <https://goo.gl/d67WcP>

BLOQUE 3 | SECTION 3

Conclusiones y futuras líneas de investigación

Conclusions, and future research

3. Conclusions

The last block in the doctoral thesis provides conclusions from the research project, in the form of responses to the research questions posed in the first block. Moreover, we provide an assessment of meeting the main objective, and general conclusions are proposed. In closing, we propose a series of new lines of research related to studying the effects of congestion on the land use - transport - society system, which were beyond the scope of the thesis or would help to overcome some of the limitations observed in this work.

3.1. Responses related to the research questions

- a) *Is accessibility a good indicator to discover and assess the effects and consequences of congestion on the territory?*

As seen throughout the thesis, the concept of accessibility is a good candidate to increase understanding and assessment of the effects and consequences of congestion on the territory. Accessibility allows us to conduct a study on congestion with a holistic approach to the measure of the performance of the land use - transport - society system, and can incorporate the temporal dynamism of the components.

Different proposals have been made to define the concept of accessibility and the indicators to obtain ratio measurements. For each individual aspect, or for each type of aggregation of individuals, we have attempted to estimate the value for interaction potential with a series of opportunities, within a study period and area. Accessibility's main contribution to congestion studies is precisely changing the object of study in comparison with other kinds of congestion studies: with accessibility, we study congestion from the perspective of interaction potential, incorporating valuation of spatial and temporal distribution of opportunities, as well as different capacity and abilities of individuals who may be affected.

As deduced from interpretation of Weibull's (1976) axioms (in section 1.3.1.2), the changes observed in transport network performance alter the available interaction potential for each individual. This includes changes caused by congestion, which are normally not uniform over time or space. Moreover, the network arcs do not have the same congestion patterns, nor does each area of study receive these changes in the same way. Accessibility can reveal several latent results and patterns that are the consequence of *spillover* from the spatial-temporal

effects of congestion.

Unlike other kinds of studies, such as mobility studies, accessibility studies do not explicitly require any individual under study to make any displacement affected by congestion in order to measure how said individual may be affected. We analyse whom, and to which extent, and for how long, they are affected by the reduced interaction potential caused by congestion on a specific section or the transport network in the environment, and not only individuals directly experiencing the effects of congestion. This characteristic of accessibility studies also means that changes are not the exclusive consequence of the opportunity used by the individual during the study.

Note that, despite introducing dynamism into accessibility indicators, in any of its components, and especially with *potential accessibility* (the measurement used in this document), a large part of the analyses and interpretations of the results could also be conducted similarly to those customarily conducted in accessibility, which tend to follow Weibull's (1976) axioms. For this reason, we were able to take advantage of all prior knowledge regarding accessibility to study congestion, and to overcome certain limitations related to work with purely static components in clearly dynamic environments.

Of note is the fact that, like any other indicator, accessibility cannot encompass the totality of congestion's effects. Accessibility only defines the edges and properties of the aquarium, an analogy introduced in section 1.3.1.3, where we find each mobile's accessible opportunities at each moment, but not the trajectories that the mobile selects. The problem with congestion requires using both approaches, to the extent required, and even understood as an iterative process, without excluding other possible approaches. In fact, this thesis would not have been possible with data from observed mobility and the reaction on the transport network of the areas of study.

b) *How can the dynamism of the accessibility measurement components be incorporated, with special focus for the congestion study?*

Incorporating the dynamic behaviour of the different accessibility components requires making a series of prior considerations and observations to guarantee that these indicators are used under the framework of accessibility studies. These observations were required both for total and partial incorporation of dynamism. In this work, special focus was placed on the *transport* component, since this is what directly includes the effects of congestion on the road network.

Most traditional accessibility indicators do not pose great complications when incorporating the dynamism of components into their mathematical definitions, including the *potential accessibility* indicator used in this document. This task was conducted through changes, which consisted of specifying the moment when the value of each component is considered, and references to its calculation method. However, as a result of these changes, a greater computation effort and more memory and storage availability were required than with other kinds of accessibility studies. These were the main problems that had to be addressed.

On one hand, the *transport* component, which directly incorporates congestion, requires obtaining the impedance values for the routes, considering the changes in the network throughout the study period. Even the *instantaneous travel time* model⁹⁹, requiring fewer resources than the model used in this document, *experienced travel time*, requires more resources than static studies. This is because it must automatically change all the network impedances for the assigned moment. In some cases, these changes require obtaining an interpolated value or from another period, depending on how frequently data is available.

On the other hand, the values used for each result must reference the same temporal moment; in other words, the number and distribution of opportunities must match the moment of arrival for each route, or vice-versa. In some cases, this coordination work also requires obtaining interpolated values, which increases the computational demand, as occurred with the fifth article in the thesis with impedances: the originally-obtained impedances based on the departure time from the point of origin had to be transformed into impedances based on the time of arrival at the destination.

It was necessary to introduce the dynamic behaviour of accessibility to obtain momentary values, which form the definition of the dynamic accessibility profiles used in this document. However, note that the greater the number of temporal moments used to calculate the profiles, the greater the requirement to repeat the impedance-calculation algorithms. This entails greater computational costs and a greater amount and/or size of results archives. To this end, it was necessary to compromise between precision in the results obtained, their spatial-temporal resolution and the total cost of computation.

⁹⁹ See section 1.3.3.

- c) *Can new sources on transport networks and dynamic GIS improve and increase knowledge of congestion's impact on accessibility?*

New data sources on transport networks, and more specifically with secondary data from the navigator company TomTom© used in the thesis, provide a series of advantages that overcome some of the limitations posed by other data sources. Moreover, their potential to be used in improving and furthering knowledge of congestion's impact on accessibility has been proven.

These new data sources are normally fed with a high volume and variety of actively and passively captured data, from different mobile devices. This characteristic means that performance data can be obtained from networks at the arcs where different users are located, generating the necessary quantity of data and with appropriate positional quality to discover the speed at which they can be used. Thus, studies on accessibility with congestion are not only conditioned to the arcs with static performance metres, which is the case with capacity data, but rather can incorporate network values to a very detailed extent.

The TomTom© network, known for being one of the most complete in Europe, provided all the road network performance data through a series of secondary-data products aggregated at arc level and in vectoral formats to be directly incorporated into GIS. Just like other secondary-data sources, the scope and limitations that these data may impose on the study lie precisely in the primary-data processing method and the construction of the secondary data.

In the TomTom© data used, the dynamic speed behaviour of each arc is shown as profiles. These data refer to recurring congestion conditions, since they are calculated with values collected over 24 months, excluding anomalous situations. Each arc with a profile was assigned a pre-defined speed profile by TomTom© to which it is most similar. This is thus a simplification of the speed profiles for each arc. Said profiles were formed by a speed value every 5 minutes, but intermediate values could be interpolated. 63%, in the worst of the cases, of the kilometres in the sub-networks used in the thesis had a speed profile for weekdays.

Also of note is the value provided by the GIS in almost all phases of the thesis. Like with all projects on effects on the territory, it is essential to be able to show the data with which we are going to work in the space, and the results that should undergo a series of analyses. Tools to analyse geo-located networks in GIS settings, such as those in the *Network Analyst* extension for ArcGIS, as well as different automation options available through ModelBuilder and Python

scripts, facilitated the workflow of the thesis.

Without GIS and the work methodology, a large portion of the tasks conducted would have been much more laborious, which would have also affected the quality of the results obtained. The GIS was used in all phases, from the verification and correction of anomalous values due to a partially-conducted modification and the different spatial analyses deemed pertinent, to a mapped representation of the results. Without these tools, everything would have been shown as sequences of values, which is more difficult to explain and analyse, where the territorial perspective would have been reduced to vague general conclusions, without a graphic representation.

However, it should be noted that, today, GIS's are limited as far as analysis of the temporal component is concerned, and a series of defining values from the dynamic behaviour of the results must be extrapolated, in addition to other techniques. Thus, many of these values were obtained with other programmes, such as R-Project.

Finally, of note is the fact that both the methodology explained in this thesis and the tools developed in the GIS setting could be used to study any other kind of congestion with observed or simulated data, as long as the data is presented as speed profiles prepared to work with ArcGIS Desktop.

d) What animated mapping techniques can help to adequately introduce accessibility results from a dynamic perspective?

The previous section highlighted the contributions made by GIS to presentation of results at a spatial level, but it also explained limitations as soon as time is incorporated. For this reason, we explored different ways of introducing the temporal evolution of spatially distributed results through animations, to thus observe phenomena that could statistically be more difficult to study. This document only presents animations that are very easy to create, which were deemed more suitable based on the data type or result to be shown.

Animations of network congestion data according to TomTom© provide for initial spatial-temporal analyses, showing the status of the entire network and locating the most congested sections of the network at all times. Thus, we can begin to deduce the possible degree of impact of congestion in relations for each zone, being fully aware that the effects of this congestion on accessibility go back in time in the territory. We can discuss the spatial-temporal

distribution of opportunities in the same terms.

Another way to present congestion data, and that provides for a greater visual impact, is through cartograms, where the territory is deformed based on travel times, for the relations between a relevant point with the rest of the area of study. Unlike the prior animation, this explains the phenomenon of congestion showing how the city "expands" or "contracts," depending on the performance offered by the network for an initial or final moment in a specific trip. In this thesis, these values reference the minimum travel time possible. Please note that this animation graphically explains the result of the *transport* component used in dynamic accessibility.

As far as accessibility results are concerned, the animations used were based on interpolation of surfaces of values, and on showing the results on both 2D and 3D choropleth maps, in absolute values and in values relative to the situation with the best performances, or to another calculation scenario:

- 2D animations provided a view of the time-space dynamic by changing the colours in each zone, very similar to how they are shown in weather maps. However, these animations, just like the maps made by the frames, are sensitive to the legend used. For animation, the legend used must not only clearly show the variety of values in the space, but must also allow for observation of changes over time.
- 3D animations overcome dependence on the legend, since the height of the elements is what shows the accessibility value. However, there may be results that are covered by zones nearer the observation point, limiting the view of the area of study as a whole.

The animations used in this document clearly contribute value to the analyses conducted and presentation of results, which is highly advisable for any dynamic study. However, these animations require a compromise between clarity of the results we wish to show, the number of slides per second, and static support to guide the observer. The main reason for this is that, since this is an animation, there is limited time to decipher each frame and variations with sequences. The more elements there are, the greater the amount of data presented. This forces the observer to get lost in details, or to miss out on the global view of the phenomenon explained in the animation.

e) *What impact does congestion have on daily accessibility in large European cities?*

The time variation in transport network performance has been shown to have a large impact on accessibility for large European cities, as shown through the accessibility profile created by averages weighted by values from the census in the zones of origin. The results obtained provide for a whole series of initial reflections on how efficient the ground use - transport - society system is in each one of the cities studied. This analysis used the census as a static approximation to opportunity distribution, and we worked with accessibility values based on departure times: the effects of congestion propagate backward in time.

It is clear that cities have lifestyle paces (see HETUS data (Eurostat, 2009), shown in the introduction) which influence how often and times when ability to travel is required. The accessibility patterns obtained match those expected for traffic flow, although the territory modifies the magnitude of congestion's effects.

At night, most of the population does not require any travel, the network provides lesser travel times and there are greater accessibility values, considering static opportunities available all day long, as long as there are no other elements distorting this circumstance. However, during times when cities are "awake," we observe reduced accessibility as the result of increased travel times due to congestion.

During the period between congestion peaks first thing in the morning and the evening, from 09.00 to 14.00, approximately, most of the city is working or studying. During this period, accessibility losses in regard to free flow remain stable, with losses between 7% in Madrid and up to 20% in London. With the exception of Barcelona, other European cities had accessibility losses of over 15%.

During rush hour, when there is a greater demand for travel, the speed observed in all relations is decreased in comparison with the free-flow speed by up to 21.5% in Paris, or by over 16% in the German and Italian cities. However, London, with 15% loss in speed on the network, loses up to 35% in accessibility.

Except for in Spain, where losses in accessibility due to congestion are only of note during morning rush hour (with losses up to 15%), other metropolitan areas had huge losses in accessibility during both peaks (over 20%). Thus, metropolitan areas may be grouped based on the peak with the greatest loss: Italian and Spanish cities have greatest accessibility losses

during the morning, German cities have similar losses during both peaks, and London and Paris have greatest accessibility losses caused by congestion during the evening peak.

The effects of congestion can alter the order of cities with the greatest absolute accessibility value. Paris is the city with the greatest free-flow accessibility, but it goes down to second place during rush hours, beneath Madrid. On the other hand, despite being the city with the greatest population, London is third as far as its average accessibility to the population in free flow is concerned, taking fourth place almost all day long due to the effects of congestion, beneath Barcelona. The other cities' positions do not change in this classification.

f) How does congestion affect internal accessibility distribution in large European metropolitan areas?

As was to be expected, congestion distorts distribution of accessibility values in each area of study throughout the day. In general, the metropolitan areas studied, including the Netherlands, show the following series of similar patterns for each one of the congestion periods, as well as noteworthy peculiarities. The answer to this question is also based on the results obtained from accessibility studies for departure times. In other words, congestion's effects propagate backwards in time throughout the territory.

During morning rush hour, there is a high traffic flow that attempts to use manage lanes, or that circumvent the central zones of each metropolitan area (see files on metropolitan areas in Annex A). This means that congestion generally affects the peripheral zones, where the greatest losses in accessibility are observed throughout the day in each of the areas of study. Please note that these zones, which occupy most of the metropolitan area's territory, have the fewest amounts of opportunities.

During this morning rush hour period, the peripheral zones show high sensitivity to the intensity and location of congestion in main axes running through them or that are close to them. The clearest case of these affects can be observed in Paris' radial axis roads: while some of the main radial roads and road junctions scarcely bear congestion, other roadways have huge congestion that severely reduces accessibility for the zones that depend on them. The results provide a view of the "basin" for each one of the axes, as well as the degree of impact or alternative possibility that each zone in this "basin" has.

On the other hand, the zones located in the central part of the metropolitan area, or to a lesser extent, in the peripheral areas that are mainly recipients of flows, do not suffer significantly-reduced accessibility values during this congestion period. This is mainly because their lanes to access the rest of the network are not affected by congestion, their arcs have still not received a large part of the vehicles that require using these central arcs to access these destinations, and because of their high self-potential value.

Two types of behaviours in metropolitan areas can be determined based on the effects of congestion, areas whose accessibility losses due to congestion are accentuated the further the zone is from the centre, such as Madrid or German cities, or areas whose worst values form clusters with high accessibility values in intermediate zones with a trend toward the periphery, such as London, Paris, Barcelona, Italian cities and the Randstad (Netherlands). The latter case is perhaps the most representative of several centres of attraction.

The effects of morning congestion are first felt in the zones furthest from the centre of each metropolitan area, and move forward through the territory until reaching the central zones. At the moment when each zone begins suffering from reduced accessibility, their values rapidly decrease, which is the result of the rapid change in user demand on road networks in order to meet their schedules, with activities such as work or studies. The effects of recovering accessibility due to reduced congestion follow the same spatial pattern.

The effects of congestion during morning rush hour end when the values in each zone remain stable; this is the beginning of the period between congestion peaks. Please note that, as a general rule, and as the peripheral zones are further from the central zones, not only are the effects of congestion felt earlier on, but they also have their worst values before, or they go to the state between peaks before.

During the period between congestion peaks, no zone in the areas of study has their lowest accessibility value, since they improve on their values from the morning rush hour. Moreover, during this period and for London and Madrid, it was shown that accessibility was more affected by congestion in central zones, or that, both in Madrid and in Barcelona, the central zones are the ones that suffer accessibility lower than the daily average for the longest time. This is because the arcs with the highest congestion are normally located in the central network, keeping a large number of opportunities that are nearby in the space "removed."

Finally, during the evening peak, when in general the arcs located in the central zones and in the population nuclei, as well as the centre lanes toward the periphery have high congestion levels, accessibility values are once again reduced throughout the entire area of study. In this peak, the central zones in each area of study have the greatest accessibility reductions when compared with free-flow values, although this does not mean that they are the most affected by congestion. While the central zones of London, Paris and Italian cities are the most affected during this peak in comparison with the other zones, the opposite occurs in Madrid and Hamburg. In Berlin and Barcelona, the central zones are affected in a similar way as the rest of their territory.

The evening peak, unlike the morning peak, does not have sudden losses in comparison with moments prior, since there is already congestion on the network, gradually reaching the worst values. This could be the reason why no evident pattern of propagation of the effects of congestion on accessibility in the space is observed. The evolution over time of the direction of the changes observed and their magnitude is similar for all zones, with a few discrepancies that can cause propagations from centre to periphery. Also of note is the fact that, once the evening minimum has been reached, accessibility values tend to rapidly recover.

The vast majority of zones in each area of study can be classified as a peripheral zone, if their worst value is clearly observed during the morning peak, or as a central zone if their worst value is observed during the evening peak. However, there is a third type of zone that defines the transition between these two groups. In these zones, both peaks' congestion similarly affects accessibility values. Transition zones are generally located outside and around the central areas, although they can also occupy zones near the centre, such as in Madrid or Hamburg.

g) How do changes in road networks modify the impacts of congestion on accessibility?

Any modification made to the transport network and that makes changes to route impedances has an impact on accessibility and spatial distribution. In the same fashion, modifications in networks may alter demand's behaviour, which in turn can change the congestion level in the network and distort spatial-temporal distribution accessibility values. To answer the question in this section, we use the direct effect of the *transport* component in the Netherlands, while the rest of the components have not changed.

As observed, changes in the Dutch road network between 2011 and 2014, and mobility variations due to private transport, showed unequal impacts on territorial accessibility. We must remember that main improvement actions were focused on several sections in the Randstad and on motorway A2 between Amsterdam-Maastricht. We must also remember that car access was reduced in local settings, and that traffic flow increased, especially during rush hours and slightly during the rest of the day.

During rush hours, a large part of the country increased accessibility in comparison with accessibility in 2011, and the distribution of accessibility values was altered. Notwithstanding, accessibility distribution is different at each peak. Tuesdays and Thursdays are the days when the greatest improvement is observed, both due to a greater number of municipalities with improvements and due to obtaining greater improvement values. Please note that these days were the ones with the greatest reduction due to congestion in 2011.

During the morning rush hour, municipalities benefiting from new *transport* component conditions are located in the periphery areas of large cities, especially around the Amsterdam-Utrecht urban system, both inside and outside the Randstad. However, municipalities located in this urban system, joined by motorway A2, hardly improved their accessibility. On the other hand, barring a few exceptions in the east and southeast of the country, the positive effect of transport changes decreases along with the distance from these cities. The more peripheral regions, especially in the north of the country, have lost accessibility in comparison with 2011.

Regarding the evening rush hour, the pattern of effects of changes in congestion follows an almost radius-central pattern. The greatest increases, above 10%, are located in the southwest area of Amsterdam. Some exceptions are located in the east of the country, where increases are similar to those observed in the Amsterdam area. On the other hand, and unlike the morning rush hour, during this congestion peak practically no part of the country has worse accessibility results. In fact, improvement is observed in the north of the country. Only a few municipalities, mainly located to the south of Rotterdam, have accessibility losses.

In the period between peaks, and for the Friday morning rush hour, these changes in the *transport* component barely yielded any improvement in the territory. Improvements were only observed in the municipalities located inside the Randstad and along the motorway A2. This result may indicate that traffic on this axis during this period was fairly high, and that the works carried out provided for improved performance, despite the increased traffic. Municipalities in the north and east of the country had accessibility losses of up to 5%. The municipalities to the

south of Rotterdam are the most affected by the changes, since they have losses at any time of day and on any day of the week.

In summary, changes in the *transport* component in the Netherlands between 2011 and 2014 only yielded generalised improvements in the territory when their accessibility values were greatly reduced by congestion. Outside the periods of greatest congestion, no changes in territorial accessibility were produced; in fact, it may have reduced them by increasing congestion levels, either by reducing the capacity of certain urban roadways or by increasing traffic travelling through the zones with improvements. These results would seem to indicate that the aim of these actions was to improve mobility in the country's central zone.

h) How does changing opportunities distribution affect accessibility distribution? Does it mitigate or accentuate the effects of congestion? To which extent?

Spatial-temporal changes to the *ground uses* component, opportunities, bear interesting interactions with the effects of congestion in accessibility value distribution. In order to answer this question, we used the location of Twitter users as an approximation to the spatial-temporal distribution of opportunities in Madrid. The values are compared with those obtained from the static scenario drawn from the average values of travel times, and opportunities distribution as a reference scenario. We must remember that these results are based on active accessibility.

In general, the trend of concentrating users in main activities spaces makes both the self-potential value for these zones and the number of opportunities in nearby zones considerably increase. Thus, their accessibility value, only considering the dynamism of opportunities, can increase by over 5% when compared to a static scenario. We see the other side of the coin in residential areas, whose accessibility may be reduced by up to 5%, in only considering the spatial-temporal variation of opportunities, especially in the morning.

The temporal evolution of the partial effects of dynamism of opportunities on accessibility clearly depend on the type of area. Residential areas in the periphery have a very similar temporal evolution for accessibility values, with a few small differences, to the evolution observed when only considering the effects of congestion¹⁰⁰. In these zones, the reduced accessibility caused by congestion is increased by the effect of dynamism of opportunities.

On the other hand, evolution of accessibility due to changing opportunities in the activity zones

¹⁰⁰ Please see responses to questions e) and f)

is generally opposite the evolution observed caused by changes in the *transport* component. Both components counteract their effects. However, depending on the location and typology of the zone, the dynamic accessibility results are clearly different.

In central zones of the city, the intensity caused by changes in opportunity distribution at peak hours not only cancels out the effects of congestion during peak hours, but can also lead to greater accessibility values than those measured during the period between peak hours. This behaviour was also observed during mornings in the northern zones of the city of Madrid. However, in these zones, changes in activity concentration during the evening scarcely modify the effects of congestion, precisely when the greatest reductions in accessibility are present.

At a global city level, dynamism of opportunities also shows a pattern opposite the pattern observed with congestion. However, unlike activity zones, these effects are insufficient to counteract the effects of congestion in the worst-case scenarios. These changes can only reduce accessibility losses and shorten periods where the city has lower values than those calculated in the static average-value scenario.

i) *How can the study of dynamic accessibility contribute to more efficient planning of the ground use and transport system?*

Accessibility is a frequently-used indicator to plan the ground-use and transport system, or to define policies related thereto. However, it is normally viewed from an entirely static focus, which has the potential to omit part of the causes/consequences we seek to resolve through different proposals.

Indeed, the partial or total incorporation of the dynamism of components of accessibility indicators reveals part of these patterns, behaviours and functional structures that are hidden in the areas of study. This way is more efficient, either to identify problems and to create policy and action proposals, or for early detection of some of the possible undesired side effects of the proposed measures. Please note that these studies, their results and their conclusions can increase in complexity, since the temporal component must also be explicitly considered.

Next, we mention how the study of dynamic accessibility can contribute to more efficient planning of the ground-use and transport system, based on interpretation of the results from the case studies. Please note that, in all case studies, and explicitly, the temporal component is added to the valuation and evaluation of territorial and/or individual inequalities caused by

action proposals.

On one hand, adding the dynamic evolution of congestion to accessibility indicators in fact reminds the planner of the finite capacity of infrastructures, the need to consider them in his or her proposals, and that their effects can vary over the course of the day. Positive changes in accessibility entail a greater possibility for interaction, and may also lead to increased use of infrastructures. In the worst case, this can lead to results entirely opposite those sought after by the planner. By using dynamic accessibility, we can foresee that an action may be counterproductive precisely in the moment when it is required to work.

With the analyses proposed in this thesis, we can determine which zones, how and in which way, may suffer from *Spillover* effects due to changes in demand for use of a particular arc or in the network as a whole, stemming from a specific action, both in the network and in opportunities distribution. This assessment can also open the door to identifying possible complementary actions that may be necessary, if deemed applicable. This assessment can be crucial for equipment that has already been established that would be very difficult to quickly move, and that would require high accessibility from the roadway throughout the day, such as bases for all emergency services, or other similar items.

On the other hand, in acknowledgement of a tolerable congestion level proposed by Litman (2009), dynamic accessibility may act as a tool for the planner to measure possible excesses on roads. In this case, the planner is reminded of the lack of ground, characteristic of zones with higher concentrations. The desire to endow the road network in metropolitan areas with high capacity can entail high consumption of land use which, in the worst case, must be obtained by transforming other kinds of urban land. Slight reductions in accessibility due to congestion at rush hour might indicate an excess in capacity.

Finally, considering congestion in planning studies can eliminate candidate locations for new implementations, which prove to be false suitable candidates. In other words, these are zones with high accessibility values during free flow, or in the equivalent static scenario, but may suffer inadmissible accessibility losses due to congestion. This same approach can be used for changes in opportunities. Concepts such as accessibility resilience or the evolution of predicted values during time periods when the proposed equipment must be active can be added to policy principles, such as the well-known Dutch ABC philosophy (Martens & van Griethuysen, 1999).

These cases reaffirm the need to consider possible scenarios with car mobility and other methods of transport, since this would shape accessibility's spatial-temporal values. As far as proposals are concerned, it would be ideal to be able to work with values obtained from valid simulations, and in considering the changes proposed, as stated by Levine et al. (2017). However, utilising recent values observed for short-term solutions can be useful, not so much to quantify the effects, but rather precisely to identify these zones near the action that already bear symptoms of reductions due to congestion.

3.2. Final conclusions

Accessibility, presented as one of the concepts that could be an indicator of performance of the land use - transport - society system as a whole, was used in the thesis to explore changes in spatial distribution throughout the day in different densely-populated areas in the European Union, due to the ongoing variation of some of the components in this indicator. The result of incorporating these variations is the definition of dynamic accessibility indicators that provide for an evaluation of the different statuses in spatial distribution of values throughout the course of the day.

Particularly, and through the use of Geographic Information Systems and new massive data sources with a high temporal resolution, this document focused on evaluating changes in accessibility throughout the day due to the very use of the road network itself under normal circumstances. In other words, the effects of recurring congestion on accessibility. This might be considered one of the symptoms that helps to describe the operational status of the land uses - transport - society system. Recurring congestion takes place in environments with high densities and, far from having localised consequences on where it takes place and its nearby surroundings, it creates remarkable *Spillover* effects.

In general, the zones with the greatest congestion levels, both in terms of intensity and duration, are the ones with the fewest accessibility losses, since they tend to have greater self-potential values, even during times of greatest congestion. The opposite tends to occur in other zones where they also tend to acutely suffer from the effects of other road sections with congestion, where reaching them does not entail any gain in accessibility, since there is no opportunities value. Please note that similar consequences took place in displacing available opportunities, showing the importance of places of interest for the population (those the population wishes to reach at all moments in time).

The patterns described in the paragraph above may be a de facto reinforcement of the central position of central zones in each area of study, and may feed into another vicious cycle of congestion: substituting activities in said zones with other activities that must be located in clearly central positions of each city may lead to an increased need for car use to guarantee operation of the metropolitan area which, in a certain way, once again strengthens the central nature of said zones. The same results can be obtained with new central areas built in the periphery, whose operation is based on car dependency.

Although a greater accessibility value indicates a greater possibility of interacting with opportunities, and it tends to be viewed as something desirable, interpretation of patterns stemming from variations in accessibility and their intensities over the course of the day are less clear. For example, fewer reductions in accessibility caused by congestion may be the consequence of networks with excess capacity, or they may be the result of systems which, as a whole, better dissipate the negative effects of changes in components of accessibility itself.

Measuring the constant change in accessibility caused by shifting different components in the land uses - transport - society system and its changes is necessary to gain further knowledge of what is behind the spatial interaction phenomena linked to a multitude of possible interactions, both from a spatial and a temporal dimension, and to avoid possible undesired side effects.

3.3. Future lines of research

While carrying out this project, new lines of research constantly appeared and were raised. They would bring progress to the state-of-the-art of dynamic accessibility and its applicability. However, we could not include them in this document, since they exceeded its objectives. Similarly, and as a result of applying available techniques, certain problems also arose that entailed limitations conditioning the results obtained.

Acknowledgement that the cases mentioned in the paragraph above exist means that we had to make a series of proposals for future lines of research within the scope of dynamic accessibility, and of studying the effects of dynamism on the land uses - transport - society system. These proposals, which are not an exhaustive list to provide for continuation of the research in this document, can be classified into five large blocks.

The first block is related to technical problems, referring to obtaining dynamic accessibility results, calculating some of their components and their spatial-temporal integration.

On one hand, we have problems related to obtaining matrices for times experienced in large networks, such as those used in this document. First, the high cost of calculation. This can affect definition of the spatial-temporal resolution of the target of study. Secondly, using FIFO networks, valid for the purpose of this document, may be unsuitable in other cases, such as impedances and generalised transport costs. Generalisation of parallel calculation algorithms and using the network's properties, as proposed by Gunturi, Shekhar and Yang (2015) could be steps that would resolve these limitations.

On the other hand, we have aspects related to operation of the dynamic accessibility measurements. Here, what stands out is the need to find methodologies that can improve how we obtain internal travel times. This should allow for working with internal times that are also variable over time, and not constant, as used in this thesis. These improvements could be closely bound to the progress points described in the previous paragraph. Both cases could pose changes in analysis, due to combined effects.

The second block reveals the need for new tools and methodologies to interpret and analyse the spatial-temporal results of dynamic accessibility. In the thesis, results were analysed in two steps. First, we had to omit a dimensional, temporal or spatial component, obtaining values that define the results in the other component, so we could finally use these summary values to analyse the initially-omitted component. Please see, for example, how the definition of clusters only references the temporal component, but distribution in spatial components is studied.

This work process can mask phenomena, since it cannot consider the spatial and temporal components conjointly in the analysis. For this reason, it would be suitable to find new techniques to work with components from this problem conjointly. In parallel, we must continue to propose new methodologies which, even while continuing with the two-step analysis paradigm used in the thesis, can analyse results from dynamic accessibility in greater detail.

The third block is related to using different dynamic accessibility measurements to increase knowledge, to the extent possible, of the complex land uses, transport and society system, and the consequences that each one of these individual aspects has on these variations. These works must attempt to define, understand and model individual reactions that may be

caused by the daily variation in accessibility values within the framework of study of these indicators, both for short-term, and for mid- and long-term reactions. Similarly, we could study both the mechanisms that can cause the reaction, and possible non-reactions or resistance to changes.

This type of study should include the dynamism not only of congestion on road networks, but also of other modes of transport, of opportunities availability, approximations to user types and the evolution of their willingness to interact with a certain opportunity throughout the day. Fortunately, the data necessary to conduct these studies are increasingly available, or the means needed to record and store the data are present. Results and conclusions obtained from these studies should match policy and planning proposals coordinated with land-use and transport-system planning.

The fourth block contains studies that entail direct application of dynamic accessibility opportunities to policies and actions for optimum or sub-optimum placement of certain equipment that is highly sensitive to accessibility changes. These studies could be oriented both toward new equipment and toward assessing effects on existing equipment. Please note that this new equipment could also incorporate temporal dynamism in its location; solutions could be suggested where some of them are temporary and/or mobile, in order to meet the proposed objectives.

With this kind of study, we can also measure the efficiency of the location solution implemented, thanks to prior studies, in current or future situations, and in relation to the best solutions obtained through models that incorporate the dynamism of user location and of transport network performance. These proposals could be linked to the studies indicated in the block above, to discover to which extent individuals can anticipate changes in dynamic accessibility patterns.

Finally, the fifth block is related to exploration of other ways of presenting and viewing the spatial-temporal results, so as to facilitate sharing certain results, even with individuals not familiar with dynamic accessibility. It should be possible for these other methods of viewing results to include a certain component of user interaction, not only in showing the results, but also in the variables considered for viewing, as occurs with studies that are somewhat similar in web settings. We should also explore how new mapping tools, such as story maps, can help in this regard, since, on certain occasions, it may be necessary to include short accounts in the different maps.

3. Conclusiones

El último bloque de la tesis doctoral recoge las conclusiones del trabajo, en forma de respuesta a las preguntas de investigación que se formularon en el primer bloque. Además, se realiza la valoración del cumplimiento del objetivo principal y se proponen unas conclusiones generales. Para finalizar, se proponen una serie de nuevas líneas de investigación relacionadas con el estudio de los efectos de la congestión en el sistema usos del suelo – transporte – sociedad, que excedían el objeto de la tesis o que ayudarían a superar algunas de las limitaciones observadas en el presente trabajo.

3.1. Respuestas relacionadas con las preguntas de investigación

- a) *¿Es la accesibilidad un buen indicador para conocer y evaluar los efectos y consecuencias de la congestión en el territorio?*

Como se ha visto a lo largo de la tesis, el concepto de accesibilidad es un buen candidato para ampliar el conocimiento y la evaluación de los efectos y consecuencias de la congestión en el territorio. La accesibilidad permite realizar un estudio de la congestión desde una aproximación holística, a la medida del rendimiento del sistema usos del suelo – transporte – sociedad y puede incorporar el dinamismo temporal de las componentes.

El concepto de accesibilidad ha tenido diferentes propuestas de definición y de indicadores para la obtención de medidas de razón. Para cada individuo, o para cualquier tipo de agregación de individuos, se ha intentado estimar el valor del potencial de interacción con una serie de oportunidades, dentro de un área y periodo de estudio. El principal aporte de la accesibilidad en los estudios de congestión es, precisamente, el cambio del objeto de estudio con respecto a otro tipo de estudios de congestión: con la accesibilidad, se estudia la congestión desde la perspectiva del potencial de interacción, incorporando la valoración de la distribución espacial y temporal de las oportunidades, así como de las diferentes capacidades y habilidades de los individuos que pueden verse afectados.

Tal y como se deduce de la interpretación del segundo axioma de Weibull (1976) (mostrados en la sección 1.3.1.2), los cambios observados en el rendimiento de la red de transporte alteran el potencial de interacción disponible de cada individuo. Esto incluye a los cambios

originados por la congestión, los cuales no suelen ser uniformes ni en el tiempo ni el espacio: ni los arcos de la red tienen los mismos patrones de congestión, ni cada zona del área de estudio recibe de la misma manera estos cambios. La accesibilidad puede revelar varios patrones y resultados latentes consecuencia del desbordamiento, efecto *Spillover*, de los efectos de la congestión a nivel espaciotemporal.

A diferencia de otros tipos de estudios, como pueden ser los estudios de movilidad, los estudios de la accesibilidad no requieren explícitamente que ningún individuo en estudio realice algún desplazamiento afectado por la congestión para poder medir como le puede afectar: se analiza a quiénes, en qué medida y por cuanto tiempo están afectados por la reducción del potencial de interacción debido a la congestión de un tramo en concreto o de la red de transporte de su entorno, y no solo quién experimenta directamente los efectos de la congestión. Esta característica de los estudios de accesibilidad también hace que los cambios no sean consecuencia exclusiva de la oportunidad usada por el individuo durante el estudio.

Nótese que, pese a la introducción del dinamismo en los indicadores de accesibilidad, en cualquiera de sus componentes, y en especial en el caso de la *accesibilidad potencial* (la medida utilizada en este documento), gran parte de los análisis e interpretaciones de los resultados se pueden realizar de manera similar a los realizados habitualmente en accesibilidad, los cuales suelen seguir los axiomas de Weibull (1976). Por ello, es posible aprovechar todo el conocimiento previo en materia de accesibilidad para el estudio de la congestión, así como superar algunos límites relacionados con el trabajo con componentes puramente estáticos en entornos claramente dinámicos.

Cabe destacar que, como cualquier otro indicador, la accesibilidad no puede entender la totalidad de los efectos de la congestión. La accesibilidad sólo define las aristas y propiedades del acuario, analogía presentada en la sección 1.3.1.3., en el que se encuentran las oportunidades accesibles de cada móvil en cada momento, pero no las trayectorias que el móvil elige. La problemática de la congestión requerirá del uso de ambos planteamientos en la medida que se requiera e incluso entendido como un proceso iterativo, sin excluir otros posibles planteamientos. De hecho, la tesis no hubiese sido posible sin los datos provenientes de la movilidad observada y de la reacción en la red de transporte de las áreas de estudio.

b) *¿De qué manera se puede incorporar el dinamismo de los componentes de las medidas de accesibilidad, con especial atención para el estudio de la congestión?*

Incorporar el comportamiento dinámico de los diferentes componentes de la accesibilidad requiere realizar de una serie de observaciones y consideraciones previas para garantizar el uso de estos indicadores en el marco de los estudios de accesibilidad. Estas observaciones se han requerido tanto si se incorpora el dinamismo de manera total o parcial. En este trabajo, se ha prestado especial atención a la componente *transporte* puesto a que es la que incluye directamente los efectos de la congestión en la red viaria.

La mayoría de indicadores de accesibilidad tradicionales no presentan grandes complicaciones a la hora de incorporar el dinamismo de los componentes en sus definiciones matemáticas, incluyendo el indicador de *accesibilidad potencial* usado en este documento. Esta tarea se ha podido realizar mediante cambios que han consistido en la puntualización del momento en que se considera el valor de cada componente y a referencias al método de cálculo de la misma. Sin embargo, a consecuencia de estos cambios, se ha requerido de un mayor esfuerzo computación y disponibilidad de memoria y almacenaje que en otros tipos de estudios de accesibilidad; siendo estos los principales problemas que se han debido abordar.

Por un lado, la componente *transporte*, la que incorporar directamente la congestión, requiere obtener los valores de las impedancias de las rutas teniendo en cuenta los cambios de la red a lo largo del periodo de estudio. Incluso el modelo de tiempo de viaje instantáneo¹⁰¹, menor demandante de recursos que el modelo usado en este documento – tiempos de viajes experimentados, requiere mayor cantidad de recursos que los estudios estáticos. Esto es debido a que debe cambiar automáticamente todas las impedancias de la red para el momento asignado. En algunos casos, estos cambios requieren obtener un valor interpolado o relativo a otro periodo, dependiendo de la periodicidad de la que se disponen de datos.

Por otro lado, los valores utilizados para cada resultado deben hacer referencia al mismo momento temporal; es decir, el número y distribución de oportunidades debe coincidir con el momento de llegada de cada ruta o viceversa. En algunos casos, estos trabajos de coordinación requieren obtener también valores interpolados, que añade mayor demanda de computación, tal y como ha ocurrido en el caso del quinto artículo de la tesis, con las impedancias: se ha debido transformar las impedancias obtenidas originalmente y basadas

¹⁰¹ Véase sección 1.3.3.

en hora de salida de origen a impedancias basadas en la hora de llegada a destino.

La introducción del comportamiento dinámico de la accesibilidad es necesario para la obtención de los valores momentáneos, que conforman la definición de los perfiles de la accesibilidad dinámica que han sido usados en este documento. Sin embargo, nótese que, a mayor número de momentos temporales utilizados para el cálculo de los perfiles, mayor requerimiento de repetición de los algoritmos de cálculo de impedancias. Esto implica mayores costes de computación y mayor cantidad y/o tamaño de los archivos resultados obtenidos. Por ello, es necesario llegar a un compromiso entre precisión de los resultados a obtener, su resolución espaciotemporal, y el coste total de computación.

c) *¿Pueden las nuevas fuentes sobre redes de transporte y el análisis dinámico en SIG mejorar y ampliar el conocimiento sobre el impacto de la congestión en la accesibilidad?*

Las nuevas fuentes de datos sobre redes de transporte, y más concretamente con los datos secundarios de la empresa de navegadores TomTom© usados en la tesis, presentan una serie de ventajas que permiten superar algunas de las limitaciones de otras fuentes de datos. Además, se ha mostrado su potencial para ser usadas en la mejora y ampliación del conocimiento del impacto de la congestión en la accesibilidad.

Estas nuevas fuentes de datos suelen nutrirse de un gran volumen y variedad de datos capturados, activamente y pasivamente, desde diferentes dispositivos móviles. Esta característica permite que se puedan obtener datos del rendimiento de las redes en los arcos en los que se encuentren algunos usuarios, generando la cantidad de datos necesarios y con la calidad posicional adecuada para conocer la velocidad a la que pueden ser usados. De esta manera, los estudios de accesibilidad con congestión no están condicionados solamente a los arcos con medidores de rendimiento estáticos, como es el caso de los datos de aforos, sino que pueden incorporar valores de la red a nivel muy detallado.

La red de TomTom©, que se caracteriza por ser una de las más completas en Europa, proporcionó todos los datos del rendimiento de la red de carreteras mediante una serie de productos de datos secundarios agregados a nivel de arco y en formatos vectoriales que permiten su incorporación directa a SIG. Al igual que otras fuentes de datos secundarias, el alcance y las limitaciones que estos datos pueden imponer al estudio está precisamente en la metodología de tratamiento de los datos primarios y en la construcción de los secundarios.

En los datos usados de TomTom®, el comportamiento dinámico de velocidad de cada arco se presenta en forma de perfiles. Estos datos hacen referencia a condiciones de congestión recurrente, puesto a que están calculados con valores recogidos durante 24 meses, excluyendo las situaciones anómalas. Cada arco con perfil fue asignado por TomTom® a un perfil de velocidad predefinido con el que tiene el mayor parecido. Se trata, por tanto, de una simplificación de los perfiles de velocidad de cada arco. Dichos perfiles estaban formados por un valor de velocidad cada 5 minutos, pero pudiendo interpolar los valores intermedios. El 63%, en el peor de los casos, de los kilómetros de las subredes utilizadas en la tesis tenían perfil de velocidad para los días de entre semana.

También se debe mencionar el valor aportado por los SIG en casi todas las fases de la tesis. Como en todo trabajo de efectos sobre el territorio, es fundamental poder mostrar en el espacio los datos con los que se va a trabajar y los resultados sobre los que se debe realizar una serie de análisis. Disponer de herramientas de análisis de redes geolocalizadas en entorno SIG, como las presentes en la extensión *Network Analyst* para ArcGIS, así como las diferentes opciones de automatización disponibles, vía ModelBuilder o scripts de Python, ha facilitado el flujo de trabajo de la tesis.

Sin el uso del SIG y su metodología de trabajo, gran parte de las tareas realizadas hubiesen sido algo más laboriosas, afectando también a la calidad de los resultados obtenidos. El SIG ha sido usado en todas las fases, desde las tareas de chequeo y corrección de valores anómalos por alguna modificación parcialmente realizada, los diferentes análisis espaciales que se han considerado oportunos realizar, hasta la presentación cartográfica de los resultados. Sin estas herramientas, todo hubiese quedado representado en secuencias de valores, más difíciles de explicar y analizar, y en los que la perspectiva territorial se hubiese visto reducido a vagas conclusiones generales y sin expresión gráfica.

Sin embargo, se debe reconocer que, actualmente, los SIG están limitados en cuando a los análisis con componente temporal, debiéndose extrapolar una serie de valores definitorios del comportamiento dinámico de los resultados entre otras técnicas. Así, muchos de estos valores se obtuvieron con otros programas, tales como R-Project.

Finalmente, se debe destacar que tanto la metodología explicada en esta tesis como las herramientas desarrolladas en entorno SIG pueden servir para el estudio de cualquier otro tipo de congestión con datos observados o simulados, siempre y cuando estos se presenten en forma de perfiles de velocidad preparados para trabajar en ArcGIS Desktop.

d) *¿Qué técnicas de cartografía animada pueden ayudar presentar de una forma adecuada los resultados de accesibilidad desde una perspectiva dinámica?*

En el punto anterior, se han destacado los aportes que los SIG han realizado a la presentación de los resultados a nivel espacial, pero también se ha expuesto su limitación en cuanto se incorpora el tiempo. Es por ello que se han explorado diferentes formas de presentar, mediante animaciones, la evolución temporal de los resultados espacialmente distribuidos y así observar fenómenos que estáticamente podrían ser más difíciles de estudiar. En este documento sólo se han presentado aquellas animaciones de gran facilidad de creación, que se consideraron más adecuadas según el tipo de dato o resultado a representar.

Las animaciones de los datos de la congestión en la red según TomTom© permite realizar los primeros análisis espaciotemporales, presentando el estado de toda la red y ubicando los tramos más congestionados de la red en cada momento. De esta manera, se puede empezar a deducir el posible grado de afectación de la congestión en las relaciones de cada zona, teniendo claro que, los efectos de esa congestión en la accesibilidad se desplazan hacia el pasado sobre el territorio. En los mismos términos se puede hablar de la distribución espaciotemporal de las oportunidades.

Otra forma de presentar los datos de congestión y que ha presentado un mayor impacto visual ha sido el uso de cartogramas, en los que el territorio se deforma según los tiempos de viajes, para las relaciones entre un punto relevante con el resto de la zona de estudio. A diferencia de la anterior animación, ésta explica el fenómeno de la congestión mostrando cómo se “expande” o se “contrae” la ciudad en función del rendimiento que le ofrece la red para un momento de inicio o final de viaje concreto. En esta tesis, estos valores hacen referencia al tiempo mínimo de viaje posible. Nótese que esta animación explica de manera gráfica el resultado de la componente *transporte* usado en la accesibilidad dinámica.

En cuanto a los resultados de la accesibilidad, las animaciones empleadas se han basado en la interpolación de superficies de los valores, y en la presentación de los resultados en mapas de coropletas, tanto en 2D como en 3D, en valores absolutos y en valores relativos a la situación con mejores rendimientos o a otro escenario de cálculo:

- Las animaciones 2D han permitido ver la dinámica espacio temporal mediante el cambio de colores de cada zona, de manera muy similar a la que se presentan en mapa meteorológicos. Sin embargo, estas animaciones, al igual que los mapas que

conforman sus fotogramas, son sensibles a la leyenda que se use. En el caso de la animación, la leyenda que se use no solo debe representar claramente la variedad de valores en el espacio, sino que también debe permitir observar los cambios en el tiempo.

- Las animaciones 3D permiten superar la dependencia de la leyenda, puesto que es la altura de los elementos la que representa el valor de accesibilidad. Sin embargo, puede existir resultados que sean tapados por zonas más próximas al punto de observación, limitando la visualización del conjunto del área de estudio.

Las animaciones usadas en este documento claramente aportan valor a los análisis realizados y la presentación de los resultados, algo altamente aconsejable en cualquier estudio dinámico. Sin embargo, estas animaciones requieren un compromiso entre la nitidez de los resultados que se quieren mostrar, el número de diapositivas por segundo y un apoyo estático para orientar al observador. El principal motivo es que, al ser una animación, se dispone de un tiempo limitado para descifrar cada fotograma y las variaciones con los correlativos. A mayor número de elementos, mayor cantidad de datos presentados, obligando al observador a perderse detalles o a perder la globalidad del fenómeno explicado en la animación.

e) *¿Qué impacto tiene la congestión en la accesibilidad diaria de las grandes ciudades europeas?*

La variación temporal del rendimiento de la red de transporte ha mostrado tener un importante impacto en la accesibilidad de las grandes ciudades europeas, como se ha mostrado a través del perfil de accesibilidad generado por medias ponderadas por valores del censo en zonas orígenes. Los resultados obtenidos permiten abrir toda una serie de primeras reflexiones sobre cuán eficiente es el sistema usos del suelo – transporte – sociedad en cada una de las ciudades estudiadas. En este análisis se han usado el censo como aproximación estática a la distribución de las oportunidades, y se ha trabajado con valores de accesibilidad según horas de salida: los efectos de la congestión se propagan hacia atrás en el tiempo.

Es evidente que las ciudades tienen unos ritmos de vida, véase los datos de HETUS (Eurostat, 2009) expuestos en la introducción, que inciden en la cantidad y los momentos en que se demanda poder desplazarse. Los patrones de accesibilidad obtenidos se corresponden con los esperados por el flujo de tráfico, aunque el territorio modifica la magnitud de la afección de la congestión.

Por la noche, la mayoría de la población no requiere realizar ningún la red permite obtener los menores tiempos de viajes y se obtienen los mayores valores de accesibilidad, considerando oportunidades estáticas y disponibles todo el día, y siempre que no haya otros elementos que distorsionen este hecho. Sin embargo, en momentos en que las ciudades ya están “despiertas”, se observa una reducción de la accesibilidad como consecuencia del incremento de los tiempos de viajes debido la congestión.

En el periodo entre los picos de congestión de la primera hora de la mañana y de la tarde, de 09.00 a 14.00 aproximadamente, la ciudad se encuentra mayoritariamente trabajando o estudiando. En este periodo, las pérdidas de accesibilidad con respecto a las de flujo libre permanecen estables, con pérdidas de entre apenas el 7% para el caso de Madrid hasta más del 20% en el caso del área de Londres. Con la excepción de Barcelona, el resto de ciudades europeas presentan pérdidas de accesibilidad de más del 15%.

En horas punta, cuando existe la mayor demanda de desplazamientos, la velocidad observada en todas las relaciones se ve disminuida con respecto a la velocidad en flujo libre en hasta un 21,5% en París o en más del 16% en las ciudades alemanas e italianas. Sin embargo, Londres, que presenta unas pérdidas del 15% en la velocidad en la red, llega a perder hasta un 35% de su accesibilidad.

Salvo en los casos españoles, donde las pérdidas en la accesibilidad por congestión solo se observan de manera destacada en la hora punta de la mañana (con pérdidas de hasta el 15%), el resto de áreas metropolitanas han mostrado pérdidas importantes de accesibilidad en ambos picos (superiores al 20%). Así, las áreas metropolitanas pueden agruparse según el pico de mayor pérdida: las ciudades italianas y españolas tienen la mayor pérdida de accesibilidad por la mañana, las ciudades alemanas tienen pérdidas similares en ambos picos, mientras Londres y París tienen las mayores pérdidas de accesibilidad por congestión durante el pico de la tarde.

Los efectos de la congestión pueden alterar el orden de las ciudades con mayor valor de accesibilidad absoluta. París es la ciudad con mayor accesibilidad en flujo libre, pero desciende a la segunda posición en las horas punta, por debajo de Madrid. Por su parte, Londres, a pesar de ser la ciudad con más población, es la tercera en cuanto a su accesibilidad media a población en flujo libre, situándose en cuarta posición durante casi todo el día por los efectos de la congestión, por debajo de Barcelona. El resto de ciudades no alteran su posición en dicha clasificación.

f) *¿Cómo afecta la congestión a la distribución de la accesibilidad interna en las grandes áreas metropolitanas europeas?*

Tal y como era de esperar, la congestión distorsiona la distribución de los valores de la accesibilidad dentro de cada área de estudio a lo largo del día. En general, las áreas metropolitanas estudiadas, incluyendo las neerlandesas, muestran la siguiente serie de patrones similares para cada uno de los periodos de congestión, así como peculiaridades destacables. La respuesta a esta pregunta también se basa en los resultados obtenidos de los estudios de accesibilidad a partir de horas de salida. Es decir, los efectos de la congestión se propagan hacia atrás en el tiempo por el territorio.

En la hora punta de la mañana, existe un elevado flujo de tráfico que intenta usar los carriles de acceso o que circunvalan a las zonas centrales de cada área metropolitana (véase fichas de las áreas metropolitanas del Anexo A). Esto provoca que la congestión afecte generalmente a las zonas periféricas, dónde se registran las mayores pérdidas de accesibilidad observadas a lo largo del día en cada las áreas de estudio. Nótese como estas zonas, que ocupan la mayor parte del territorio del área metropolitana, presentan las menores cantidades de oportunidades.

Durante este periodo de punta de la mañana, las zonas periféricas muestran una alta sensibilidad a la intensidad y localización de la congestión en los principales ejes que las atraviesan o que se encuentran próximos a ellas. El caso más claro de esta afectación puede verse en los ejes radiales de París: mientras algunas de las principales carreteras radiales y nudos viarios apenas reportan congestión, otras carreteras muestran importantes retenciones que reducen severamente los valores de accesibilidad de las zonas que dependen de ellas. Los resultados permiten visualizar la “cuenca” de cada uno de los ejes, así como el grado de afección o posibilidad de alternativa que cada zona de dicha “cuenca” dispone.

Por su parte, las zonas situadas en las ubicaciones centrales del área metropolitana o, en menor medida, en zonas periféricas principalmente receptoras de flujos no sufren reducciones significativas en sus valores de accesibilidad en este periodo de congestión. Esto se debe principalmente a que sus carriles de acceso al resto de la red no están afectados por la congestión, a que sus arcos aún no han recibido a gran parte de los vehículos que requieren usar esos arcos centrales para acceder a estas localizaciones destino, y a su alto valor de autopotencial.

Dos tipos de comportamientos de las áreas metropolitanas se pueden determinar a partir de la afectación de la congestión, aquellas cuyas pérdidas de accesibilidad por congestión se acentúan a medida que la zona está más alejada del centro, tales como Madrid o las ciudades alemanas, o aquellas cuyos peores valores forman clústeres con valores de accesibilidad elevada en zonas intermedias con tendencia hacia la periferia, tales como Londres, París, Barcelona, las ciudades italianas y en el Randstad (Países Bajos). Este último caso puede ser el más representativo de la presencia de varios centros de atracción.

Los efectos de la congestión de la mañana se notan primero en las zonas más alejadas del centro de cada área metropolitana y van avanzando por el territorio hasta llegar a las zonas centrales. En el momento en que cada zona empieza a experimentar la reducción de la accesibilidad, sus valores disminuyen rápidamente, consecuencia del rápido cambio de la demanda a la que se somete a la red de carreteras por parte de los usuarios para intentar cumplir con horarios de actividades como trabajo o estudios. Los efectos de recuperación de la accesibilidad por reducción de la congestión siguen el mismo patrón espacial.

Los efectos de la congestión de la hora punta de la mañana acaban cuando los valores de cada zona se mantienen estables; se da inicio al periodo entre picos de congestión. Nótese que, como norma general y a medida que las zonas periféricas se encuentran más alejadas de las zonas centrales, no solo más temprano empiezan a notarse los efectos de la congestión, sino que también reportan sus peores valores antes, o cambian a estar en el estado entre picos antes.

Durante el periodo entre picos de congestión, ninguna zona de las áreas de estudio reporta su valor mínimo de accesibilidad puesto a que mejoran los valores reportados durante la hora punta de la mañana. Además, durante este periodo y en los casos de Londres y Madrid, se ha mostrado como los mayores niveles de afectación de la accesibilidad por congestión se dan en las zonas centrales, o que, tanto en Madrid como en Barcelona, las zonas centrales son las que mayor tiempo sufren accesibilidades inferiores a la media diaria. Esto se debe a que los arcos con mayor congestión se suelen situar en la red central, manteniendo “alejadas” una gran cantidad de oportunidades que se encuentran cercanas en el espacio.

Finalmente, durante el pico de la tarde, cuando en líneas generales los arcos situados en las zonas centrales y en los núcleos de población, así como los carriles del centro hacia la periferia presentan altos niveles de congestión, los valores de accesibilidad vuelven a reducirse en toda el área de estudio. En este pico las zonas centrales de cada área de estudio

son las que reportan sus mayores reducciones de accesibilidad con respecto a los valores en flujo libre, aunque esto no signifique que sean las más afectadas por la congestión. Mientras las zonas centrales de Londres, París y las ciudades italianas son las más afectadas en este pico, en relación con el resto de zonas, lo contrario ocurre en Madrid y Hamburgo. En Berlín y Barcelona las zonas centrales tienen una afectación similar que el resto de su territorio.

El pico de la tarde, a diferencia del pico de la mañana, no presenta repentinas pérdidas con respecto a momentos anteriores puesto a que ya existe congestión en la red, alcanzando los peores valores poco a poco. Esto puede ser la causa de que no se observe ningún patrón de propagación evidente de los efectos de la congestión sobre la accesibilidad en el espacio. La evolución temporal del sentido de los cambios observados y su magnitud es similar para todas las zonas, con algunos pequeños desfases que pueden generar propagaciones de centro a periferia. También es de destacar que, una vez alcanzado el mínimo de la tarde, los valores de accesibilidad tienden a recuperar accesibilidad rápidamente.

La gran mayoría de zonas de cada área de estudio pueden ser clasificadas como zona periférica, si su peor valor es claramente observado durante el pico de la mañana, o como zona central, si su peor valor se observa en el pico de la tarde. Sin embargo, existe un tercer tipo de zonas que definen la transición entre estos dos grupos. En estas zonas, la congestión de ambos picos afecta de manera similar a los valores de accesibilidad. Las zonas de transición se localizan generalmente en los alrededores de las áreas centrales, aunque también puede ocupar zonas cercanas al centro tal y como ocurre en Madrid o Hamburgo.

g) ¿Cómo modifican los cambios en las redes de carreteras los impactos de la congestión en la accesibilidad?

Cualquier modificación que se realice en la red de transporte y que comporte cambios en las impedancias de las rutas tiene un impacto sobre la accesibilidad y su distribución espacial. Del mismo modo, las modificaciones en las redes pueden alterar el comportamiento de la demanda, que a su vez pueden cambiar el nivel de congestión en la red, y distorsionar la distribución espaciotemporal de valores de la accesibilidad. Para contestar a la pregunta de este apartado se usa el efecto directo de la componente *transporte* en el caso de los Países Bajos, mientras el resto de componentes no han cambiado.

Tal y como se ha visto, los cambios de la red neerlandesa de carreteras entre 2011 y 2014, y las variaciones de la movilidad por transporte privado, han mostrado impactos desiguales en

la accesibilidad territorial. Recuérdese que las principales actuaciones de mejora se han concentrado en varios tramos en el Randstad y en la autopista A2 entre Ámsterdam-Maastricht. También recordar que en entornos locales se redujo el acceso al coche, y que el flujo de tráfico aumentó, especialmente en las horas punta y ligeramente durante el resto del día.

En las horas punta, gran parte del país ha aumentado la accesibilidad con respecto a la experimentada en 2011, y se ha alterado la distribución de valores de accesibilidad. No obstante, la distribución de accesibilidad es diferente en cada pico. Los martes y los jueves son los días en los que mayores mejoras se observan, tanto por presentar mayor número de municipios con mejoras como por obtener mayores valores de mejora. Nótese que estos días eran los que mayores reducciones por congestión reportaron en 2011.

En la hora punta de la mañana, los municipios que se benefician de las nuevas condiciones de la componente *transporte* se localizan en las periferias de las grandes ciudades, especialmente alrededor del sistema urbano Ámsterdam-Utrecht, tanto dentro como fuera del Randstad. Sin embargo, los municipios situados en este sistema urbano, unidos por la autopista A2, apenas mejoran su accesibilidad. Por otro lado, salvo algunas excepciones en el este y el sureste del país, el efecto positivo de los cambios del transporte va disminuyendo con la distancia a estas ciudades. Las regiones más periféricas, en especial las del norte del país, reportan valores de pérdida de accesibilidad con respecto a 2011.

Referente a la hora punta de la tarde, el patrón de los efectos de los cambios de la congestión sigue un patrón casi radio céntrico. Los mayores incrementos, por encima del 10%, se localizan en el entorno suroeste de Ámsterdam. Algunas excepciones se localizan al este del país, donde los incrementos reportados son similares a los observados en la zona de Ámsterdam. Por otro lado, y a diferencia de la hora punta de la mañana, en este pico de congestión prácticamente ninguna parte del país empeora sus resultados de accesibilidad, incluso se observa una mejora en el norte del país. Solamente algunos municipios, principalmente situados al sur de Rotterdam, muestran pérdidas de accesibilidad.

En el periodo entre picos y para la hora punta de la mañana de los viernes, estos cambios en la componente *transporte* apenas reportan mejora alguna en el territorio. Solamente reportan alguna mejoría los municipios situados en el interior del Randstad y a lo largo de la autopista A2. Este resultado puede indicar que el tráfico en este eje durante este periodo era bastante elevado, y que las obras realizadas han permitido mejorar su rendimiento pese al aumento de

tráfico. Los municipios del norte y este del país reportan pérdidas de accesibilidad de hasta el 5%. Los municipios al sur de Rotterdam son los más afectados por los cambios, puesto a que en cualquier hora del día y día de la semana reportan pérdidas.

En resumen, los cambios en la componente *transporte* en los Países Bajos entre 2011 y 2014 solo han reportado mejoras generalizadas en el territorio cuando sus valores de accesibilidad estaban muy mermados por la congestión. Fuera de los periodos de mayor congestión, no se han reportado cambios en la accesibilidad territorial; incluso puede haber provocado una reducción de estos al aumentar los niveles de congestión, ya sea por reducción de capacidad en algunas vías urbanas, como por incrementos de tráfico que pasan por zonas con alguna mejora. Estos resultados parecen indicar que dichas actuaciones tenían como objetivo la mejora en la movilidad en la zona central del país.

h) ¿Cómo el cambio de la distribución de las oportunidades afecta a la distribución de la accesibilidad? ¿Mitiga o acentúa los efectos de la congestión? ¿En qué grado?

Los cambios espaciotemporales de la componente *usos del suelo*, las oportunidades, muestran interesantes interacciones con los efectos de la congestión en la distribución de los valores de accesibilidad. Para dar respuesta a esta pregunta, se ha usado la localización de los usuarios de Twitter como aproximación a la distribución espaciotemporal de las oportunidades en Madrid. Los valores se comparan con los obtenidos del escenario estático obtenido de los valores medios de tiempos de viajes y la distribución de oportunidades como escenario de referencia. Recuérdese que estos resultados se basan en accesibilidad activa.

En líneas generales, el hecho de tender a la concentración de usuarios en los principales espacios de actividades hace que tanto el valor de autopotencial de estas zonas como el número de oportunidades en zonas cercanas aumente considerable. Así, su valor de accesibilidad, solo considerando el dinamismo de las oportunidades, puede aumentar en más de un 5% con respecto a un escenario estático. La otra cara de la moneda se observa en las zonas residenciales, que pueden ver reducida su accesibilidad hasta en un 5% al considerar solamente la variación espaciotemporal de las oportunidades, sobre todo por las mañanas.

La evolución temporal de los efectos parciales del dinamismo de las oportunidades en la accesibilidad depende claramente del tipo de zona. Las zonas residenciales de la periferia muestran una evolución temporal de los valores de la accesibilidad muy similar, con algún

pequeño desfase, a la observada en el caso de solo considerar los efectos de la congestión ¹⁰². En estas zonas, la reducción de la accesibilidad derivada de la congestión se incrementa por el efecto del dinamismo de las oportunidades.

Por su parte, la evolución de la accesibilidad por el cambio de las oportunidades en las zonas de actividad, en general, es contraria a la observada con motivo de los cambios de la componente *transporte*. Ambas componentes contrarrestan sus efectos. Sin embargo, dependiendo de la ubicación y tipología de la zona, los resultados sobre la accesibilidad dinámica son claramente diferentes.

En las zonas centrales de la ciudad, la intensidad que provocan los cambios en la distribución en las oportunidades en las horas punta, no solo consiguen anular los efectos de la congestión en las horas punta, sino que además pueden experimentar valores de accesibilidad mayores que los medidos en el periodo entre horas punta. Este comportamiento también fue observado por las mañanas en las zonas del norte de la ciudad de Madrid. Sin embargo, en estas zonas, los cambios en la concentración de actividades en la tarde apenas pueden modificar los efectos de la congestión, precisamente cuando están experimentando las mayores reducciones de accesibilidad.

A nivel global de la ciudad, el dinamismo de las oportunidades también muestra un patrón opuesto al observado en la congestión. Sin embargo, a diferencia de las zonas de actividad, estos efectos no son suficientes para contrarrestar los efectos de la congestión en los peores escenarios. Estos cambios únicamente pueden reducir las pérdidas de accesibilidad y acortar los periodos en los que la ciudad reporta menor valor que los calculados en el escenario estático de valores medios.

i) *¿Cómo puede el estudio de la accesibilidad dinámica contribuir a una planificación más eficiente del sistema de transporte y usos del suelo?*

La accesibilidad es un indicador usado con frecuencia en la planificación del sistema de transporte y usos del suelo o en la definición de las políticas relacionadas. Sin embargo, éste suele verse desde un enfoque totalmente estático, que puede omitir parte de las causas/consecuencias que se intentan solucionar con diferentes propuestas.

Precisamente la incorporación, parcial o total, del dinamismo de las componentes de los

¹⁰² Véase respuestas de las preguntas e) y f)

indicadores de accesibilidad permite revelar parte de estos patrones, comportamientos y estructuras funcionales ocultos de las áreas de estudio. De esta manera, se puede obtener una mayor eficiencia ya sea en la identificación de problemáticas, en la generación de propuestas de políticas y actuaciones a realizar, o en la detección precoz de algunos de los posibles efectos secundarios no deseados por las medidas propuestas. Nótese que estos estudios pueden aumentar su complejidad, así como de los resultados y de las conclusiones, al requerir considerar también la componente temporal de manera explícita.

A continuación, se mencionan cómo el estudio de la accesibilidad dinámica puede contribuir a una planificación más eficiente del sistema de transporte y usos del suelo, desde la interpretación de los resultados de los casos de estudio. Nótese que, en todos los casos de estudio y de manera explícita, se añadirá la componente temporal a la valoración y evaluación de las desigualdades territoriales y/o individuales producidas por las propuestas de actuaciones.

Por un lado, incorporar la evolución dinámica de la congestión en los indicadores de accesibilidad permite recordar al planificador, precisamente, la capacidad finita de las infraestructuras, la necesidad de considerarla en sus propuestas y qué sus efectos pueden variar a lo largo del día. Cambios positivos en accesibilidad implican mayor posibilidad de interacción, pudiendo conllevar incremento en el uso de las infraestructuras. Esto puede provocar, en el peor de los casos, resultados totalmente opuestos a los deseados por el planificador. Mediante el uso de la accesibilidad dinámica, se puede advertir de que una actuación puede ser contraproducente precisamente en el momento que se requiere que funcione.

Con los análisis propuestos en esta tesis se puede determinar qué zonas, cómo y de qué manera, pueden sufrir los efectos *Spillover* por cambios de la demanda de uso de un arco en particular o en el conjunto de la red, derivados de alguna actuación concreta, tanto en la red como en la distribución de oportunidades. Esta valoración también puede abrir la puerta a identificar posibles actuaciones complementarias necesarias, en el caso que se estime oportuno. Esta valoración puede ser crucial en equipamientos ya establecidos, con pocas posibilidades de cambios de ubicación rápida y que requieren de alta accesibilidad por carretera a lo largo del día, tal y como podrían ser las bases de cualquier servicio de emergencias, entre otros casos.

Por otro lado, en línea al reconocimiento de un nivel de congestión tolerable propuesto por

Litman (2009), la accesibilidad dinámica puede servir al planificador como herramienta de medición de posibles excesos en carreteras. En este caso, se le recuerda al planificador la escasez de suelo característica de las zonas con mayores concentraciones. Querer dotar de una alta capacidad en la red de carreteras de las áreas metropolitanas puede suponer un alto consumo de uso de suelo que, en el peor de los casos, se deberá obtener de transformaciones de otros tipos de suelo urbano. Reducciones leves de la accesibilidad por congestión en horas punta puede ser indicativo de un exceso de capacidad.

Finalmente, considerar la congestión en estudios de planificación puede eliminar localizaciones candidatas para nuevas implementaciones, que resultan ser falsas candidatas adecuadas. Es decir, aquellas zonas que tienen altos valores de accesibilidad en flujo libre o en el escenario estático equivalente, pero que pueden sufrir pérdidas inadmisibles de accesibilidad debido a la congestión. De la misma manera se puede plantear para los cambios de oportunidades. Conceptos como resiliencia de la accesibilidad o evolución de los valores esperados en los horarios en los que el equipamiento propuesto debe estar activo se pueden sumar a los principios de políticas como, por ejemplo, la conocida filosofía del ABC neerlandesa (Martens & van Griethuysen, 1999).

Estos casos reafirman la necesidad de considerar posibles escenarios de movilidad en coche, y en otros medios de transportes, puesto a que moldearán los valores espaciotemporales de la accesibilidad. En el caso de propuestas a realizar, sería oportuno poder trabajar con valores obtenidos mediante simulaciones válidas y con la consideración de los cambios propuestos, tal y como se expone en Levine et al. (2017). Sin embargo, el uso de valores observados recientes para soluciones a corto plazo puede ser útil, no tanto por poder cuantificar los efectos, sino precisamente en la identificación de esas zonas próximas a la actuación que ya muestran síntomas de reducciones por congestión.

3.2. Conclusiones finales

La accesibilidad, presentada como uno de los conceptos que pueden ser indicador del rendimiento del sistema usos del suelo – transporte – sociedad en su conjunto, ha sido usada en la tesis para la exploración de los cambios en su distribución espacial a lo largo del día en diferentes áreas densamente pobladas de la Unión Europea, debido a la variación continua de alguna de las componentes de este indicador. El resultado de la incorporación de estas variaciones es la definición de indicadores de accesibilidad dinámica que permiten evaluar los

estados diferentes de distribución espacial de sus valores a lo largo del día.

En especial, y mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y nuevas fuentes de datos masivos de alta resolución temporal, este documento se ha centrado en la evaluación de los cambios de la accesibilidad a lo largo del día debidos al propio uso de la red de carreteras en circunstancias normales. Es decir, los efectos de la congestión recurrente en la accesibilidad. Ésta puede ser considerada como uno de los síntomas que ayudan a describir el estado del funcionamiento del sistema usos del suelo – transporte – sociedad. La congestión recurrente se presenta en entornos con elevadas densidades y, lejos de tener consecuencias localizadas en dónde se produce y su entorno próximo, genera destacados efectos *Spillover*.

En líneas generales, las zonas que mayores niveles de congestión sufren, tanto en intensidad como en duración, son las que menores pérdidas de accesibilidad reportan debido a que suelen ser las que poseen mayores valores de autopotencial, incluso en los momentos de mayor congestión. Todo lo contrario, suele ocurrir en el resto de zonas que, además, sufren de manera más acusada efectos de otros tramos de carreteras que presentan congestión sin que el llegar a ellos suponga ninguna ganancia de accesibilidad, por no existir valor de oportunidades. Nótese que consecuencias similares se han reportado con el desplazamiento de las oportunidades disponibles, que reflejan la importancia de los lugares de interés para la población (aquellos que quieren ser alcanzados en cada momento temporal).

Los patrones descritos en el párrafo anterior pueden suponer un refuerzo, de facto, de la posición central de las zonas centrales de cada área de estudio, y que podría alimentar otro círculo vicioso de la congestión: la sustitución de las actividades de dichas zonas por otras que requieran localizarse en las posiciones claramente centrales de cada ciudad puede comportar un incremento de las necesidades de uso del coche para garantizar el funcionamiento del área metropolitana que, en cierta manera, vuelvan a potenciar la centralidad de dichas zonas. Mismos resultados pueden obtenerse por las nuevas centralidades construidas en la periferia y que basan su funcionamiento en la dependencia del coche.

Pese a que un mayor valor de accesibilidad indica mayor posibilidad de interactuar con oportunidades y suele entenderse como algo deseado, la interpretación de los patrones resultantes de las variaciones de la accesibilidad y sus intensidades a lo largo del día son menos claros. Por ejemplo, menores reducciones en la accesibilidad por congestión pueden

ser consecuencias de redes con exceso de capacidad o pueden ser el resultado de sistemas que, en su conjunto, disipan mejor los efectos negativos de los cambios de las componentes de la propia accesibilidad.

Medir el continuo cambio de la accesibilidad por el balanceo de los diferentes componentes del sistema usos del suelo – transporte – sociedad y de sus cambios, es necesario para poder ampliar el conocimiento del porqué de los fenómenos de interacción espacial que se vinculan a la multitud de interacciones posibles, tanto desde la dimensión espacial como temporal, y evitar posibles efectos secundarios no deseados.

3.3. Futuras líneas de investigación

Durante la realización de esta investigación han ido apareciendo y planteándose continuamente nuevas líneas de investigación que supondrían avances en el estado del arte de la accesibilidad dinámica y su aplicabilidad, pero que no han podido ser incluidos en este documento por exceder los objetivos del mismo. De manera similar, y consecuencia de la aplicación de las técnicas disponibles, también se han reportado algunas problemáticas, que han supuesto algunos límites que condicionan los resultados obtenidos.

El reconocimiento de la existencia de los casos mencionados en el párrafo anterior supone la realización de una serie de propuestas de futuras líneas de investigación en el ámbito de la accesibilidad dinámica y el estudio de los efectos del dinamismo en el sistema usos del suelo – transporte - sociedad. Estas propuestas, que no suponen una lista exhaustiva de continuaciones de las investigaciones de este documento, se pueden clasificar en cinco grandes bloques.

El primer bloque está relacionado con las problemáticas de carácter técnico, referentes a la obtención de resultados de accesibilidad dinámica, el cálculo de alguna de sus componentes, o la integración espaciotemporal de ellas.

Por un lado, están las problemáticas relacionadas con la obtención de matrices de tiempos experimentados en grandes redes, como las usadas en este documento. Primero, el elevado coste de cálculo. Esto pueden afectar a la definición de la resolución espaciotemporal del objeto de estudio. En segundo lugar, el hecho de suponer redes FIFO, válidas para el propósito de este documento, puede no ser adecuado en algunos casos, tales como impedancias como costes generalizados del transporte. La generalización de algoritmos de

cálculo paralelizado y el aprovechamiento de propiedades de la red, tal y como se propone en Gunturi, Shekhar y Yang (2015), pueden ser pasos para resolver estos limitantes.

Por otro lado, están los aspectos relacionados con la operativa de las medidas de accesibilidad dinámica. Aquí destaca la necesidad de encontrar metodologías que puedan mejorar la forma para obtener los tiempos de los viajes internos. Esto debe permitir trabajar con tiempos internos también variables en el tiempo y no contantes, como se han usado en esta tesis. Estas mejoras pueden ir estrechamente ligadas a los avances del punto anterior. Ambos casos pueden suponer algunos cambios en los análisis debido a efectos combinados.

El segundo bloque expone la necesidad de disponer de nuevas herramientas y metodologías para interpretación y el análisis de los resultados espaciotemporales de la accesibilidad dinámica. En la tesis se han analizado los resultados en dos pasos, en los que se ha requerido primeramente omitir una componente dimensional, la temporal o la espacial, obteniendo valores que definen los resultados en la otra componente para, finalmente, usar estos valores resumen para analizar la componente omitida inicialmente. Véase, por ejemplo, como la definición de clústeres solo hacen referencia a la componente temporal, pero se estudia su distribución en las componentes espaciales.

Este proceso de trabajo puede enmascarar fenómenos al no poder considerar conjuntamente las componentes espaciales y temporal en el análisis. Es por ello, que se considera adecuado hallar nuevas técnicas que permita trabajar con las componentes de este problema de manera conjunta. De forma paralela, se debe seguir proponiendo nuevas metodologías que, pese a seguir con el paradigma de análisis de dos pasos usado en la tesis, puedan analizar con mayor detalle los resultados de la accesibilidad dinámica.

El tercer bloque es el relacionado en el uso de diferentes medidas de accesibilidad dinámica con el fin de ampliar el conocimiento, en la medida de lo posible, del sistema complejo de los usos del suelo, el transporte, y la sociedad, y de las consecuencias en cada uno de estos individuos de estas variaciones. Estos trabajos deberían tratar de definir, entender y modelizar aquellas reacciones individuales que pueden estar motivadas por la variación diaria de los valores de accesibilidad dentro del marco de estudio de estos indicadores, tanto para reacciones a corto plazo, como a medio y largo plazo. De forma análoga se puede estudiar tanto los mecanismos que pueden provocar la reacción, y las posibles no reacciones o resistencia a cambios.

Este tipo de estudios deberán incluir el dinamismo no solo de la congestión de la red de carreteras, sino también de los otros modos de transporte, de la disponibilidad de las oportunidades, aproximaciones al tipo de usuarios y la evolución de su predisposición a interactuar con alguna oportunidad a lo largo del día. Afortunadamente, cada vez es mayor la disponibilidad de los datos necesarios para realizar dichos estudios o se disponen de los medios adecuados que permiten registrarlos y almacenarlos. Los resultados y conclusiones obtenidas de estos estudios deberán tener correspondencia con propuestas de políticas y planificación coordinadas de la ordenación del territorio y de los sistemas de transportes.

El cuarto bloque es el de estudios que supongan la aplicación directa de las oportunidades de la accesibilidad dinámica en políticas y actuaciones para la ubicación óptima o subóptima de algunos equipamientos altamente sensibles a los cambios de accesibilidad. Estos estudios pueden plantearse tanto para nuevos equipamientos como para valorar efectos sobre equipamientos existentes. Nótese que estos nuevos equipamientos pueden incorporar el dinamismo temporal también en su localización; se pueden plantear soluciones en las que algunos de ellos sean temporales y/o móviles, con el fin de satisfacer los objetivos propuestos.

En este tipo de estudios también puede medirse la eficiencia de la solución de localización realizada, debido a estudios previos, en situaciones actuales o futuras y en relación a las mejores soluciones obtenidas por los modelos que incorporan el dinamismo de la ubicación de los usuarios y del rendimiento de las redes de transporte. Estas propuestas pueden ir ligadas con los estudios señalados en el bloque anterior, en el sentido de conocer hasta qué punto los individuos pueden adelantarse a los cambios en los patrones de accesibilidad dinámica.

Finalmente, el quinto bloque es el relacionado con la exploración de otras formas de presentación y visualización de los resultados espaciotemporales que permitan facilitar la transmisión de algunos resultados, incluso para aquellos que no estén familiarizados con la accesibilidad dinámica. Estas otras formas de visualización de los resultados deberían poder contar con la posibilidad de cierta interacción de los usuarios, no solo en como presentar los resultados sino en tipo de variables se consideran en la visualización, tal y como ocurre en estudios con cierta similitud en entornos web. También se debería explorar como nuevas herramientas cartográficas, como los llamados *story maps*, pueden ayudar a este propósito, puesto que en algunas ocasiones puede requerirse dotar de pequeños relatos a los diferentes mapas.

BIBLIOGRAFÍA | REFERENCES

Bibliografía

- Alonso, W. (1978). Theory of the movement. In N. M. Hansen (Ed.), *Human settlements systems: international prespectives on structures, change and public policy* (pp. 197–211). Ballinge, Cambrigde, Massachusetts (United States of America).
- ArcGISTeamNetworkAnalyst. (2012). Street Data Processing Tools. Retrieved June 3, 2013, from <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=755f96fcde454ece8f790fecb3e031c7>
- Axhausen, K. W., Dolci, C., Fröhlich, P., Scherer, M., & Carosio, A. (2008). Constructing Time-Scaled Maps: Switzerland from 1950 to 2000. *Transport Reviews*, 28(3), 391–413. <https://doi.org/10.1080/01441640701747451>
- Ayuntamiento de Madrid. (2016). Tráfico. Intensidad del tráfico, ubicación de los puntos de medida. Retrieved February 21, 2018, from <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9fbe4b2e4b284f1a5a0/?vgnextoid=ee941ce6ba6d3410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD>
- Aziz, H. M. A., Ukkusuri, S. V., & Zhan, X. (2016). Determining the Impact of Personal Mobility Carbon Allowance Schemes in Transportation Networks. *Networks and Spatial Economics*. <https://doi.org/10.1007/s11067-016-9334-x>
- Balmer, M., Meister, K., Rieser, M., Nagel, K., & Axhausen, K. W. (2008). Agent-based simulation of travel demand: Structure and computational performance of MATSim-T. In *2nd TRB Conference on Innovations in Travel Modeling Portland Juni 2008* (pp. 1–33). <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005626451>
- Batty, M. (2004). *A New Theory of Space Syntax* (Vol. 44). London (the United Kingdom). Retrieved from <http://discovery.ucl.ac.uk/211/1/paper75.pdf>
- Batty, M. (2008). The size, scale, and shape of cities. *Science*, 319(5864), 769–771. <https://doi.org/10.1126/science.1151419>
- Bederman, S. H., & Adams, J. S. (1974). Job Accessibility and Underemployment. *Annals of the Association of American Geographers*, 64(3), 378–386. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2562358>
- Ben-Akiva, M. E. (1985). Dynamic network equilibrium research. *Transportation Research Part A: General*, 19(5–6), 429–431. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(85\)90042-1](https://doi.org/10.1016/0191-2607(85)90042-1)

- Ben-Akiva, M. E., & Lerman, S. R. (1979). Dissaggregate travel and mobility-choice models and measure of accessibility. In D. A. Hensher & P. R. Stopher (Eds.), *Behavioural Travel Modelling* (pp. 654–679). London (the United Kingdom): Groom Helm London.
- Benenson, I., Martens, K., Rofé, Y., & Kwartler, A. (2011). Public transport versus private car GIS-based estimation of accessibility applied to the Tel Aviv metropolitan area. *The Annals of Regional Science*, 47(3), 499–515. <https://doi.org/10.1007/s00168-010-0392-6>
- Bertolini, L., le Clercq, F., & Kapoen, L. (2005). Sustainable accessibility: A conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport Policy*, 12(3), 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.006>
- Bocarejo S., J. P., & Oviedo H., D. R. (2012). Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments. *Journal of Transport Geography*, 24, 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.12.004>
- Boisjoly, G., & El-Geneidy, A. (2016). Daily fluctuations in transit and job availability: A comparative assessment of time-sensitive accessibility measures. *Journal of Transport Geography*, 52, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.03.004>
- Bonsall, P., & Kelly, C. (2005). Road user charging and social exclusion: The impact of congestion charges on at-risk groups. *Transport Policy*, 12(5), 406–418. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.06.007>
- Boyce, D. E., Lee, D.-H., Janson, B. N., & Berka, S. (1997). Dynamic Route Choice Model of Large-scale Traffic Network. *Journal of Transportation Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1997\)123:4\(276\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1997)123:4(276))
- Braess, D. (1968). Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. *Unternehmensforschung*, 12(1), 258–268. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/BF01918335>
- Braess, D., Nagurney, A., & Wakolbinger, T. (2005). On a Paradox of Traffic Planning. *Transportation Science*, 39(4), 446–450. <https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0127>
- Breheny, M. J. (1978). The measurement of spatial opportunity in strategic planning. *Regional Studies*, 12(4), 463–479. <https://doi.org/10.1080/09595237800185401>
- Brewer, C. A., & Harrower, M. (2013). ColorBrewer2. Retrieved August 8, 2014, from <http://colorbrewer2.org/>
- Bruinsma, F. R., & Rietveld, P. (1998). The accessibility of European cities: theoretical framework and comparison of approaches. *Environment and Planning A*, 30(3), 499–521.

<https://doi.org/10.1068/a300499>

- Bruno, G., & Genovese, A. (2012). A Spatial Interaction Model for the Representation of the Mobility of University Students on the Italian Territory. *Networks and Spatial Economics*, 12(1), 41–57. <https://doi.org/10.1007/s11067-010-9142-7>
- Bull, A. (2003). *Congestión de Tránsito el problema y como enfrentarlo* (First). Santiago de Chile: United Nations.
- Casas, I. (2003). Evaluating the importance of accessibility to congestion response using a GIS-based travel simulator. *Journal of Geographical Systems*, 5(1), 109–127. <https://doi.org/10.1007/s101090300106>
- Cascetta, E., Cartenì, A., & Montanino, M. (2016). A behavioral model of accessibility based on the number of available opportunities. *Journal of Transport Geography*, 51, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.11.002>
- Chabini, I. (1998). Discrete Dynamic Shortest Path Problems in Transportation Applications: Complexity and Algorithms with Optimal Run Time. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1645(1), 170–175. <https://doi.org/10.3141/1645-21>
- Chang, Y. S., Lee, Y. J., & Choi, S. S. B. (2017). Is there more traffic congestion in larger cities? -Scaling analysis of the 101 largest U.S. urban centers-. *Transport Policy*, 59, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.07.002>
- Charalambous, N., & Mavridou, M. (2012). Space Syntax : Spatial Integration Accessibility and Angular Segment Analysis by Metric Distance (ASAMeD). In A. Hull, C. Silva, & L. Bertoloni (Eds.), *Accessibility Instruments for Planning Practice* (pp. 57–62). COST Office. Retrieved from <http://www.accessibilityplanning.eu/wp-content/uploads/2013/01/3-ASAMeD-R.pdf>
- Chen, A., Yang, C., Kongsomsaksakul, S., & Lee, M. (2007). Network-based accessibility measures for vulnerability analysis of degradable transportation networks. *Networks and Spatial Economics*, 7(3), 241–256. <https://doi.org/10.1007/s11067-006-9012-5>
- Chen, B. Y., Wang, Y., Wang, D., Li, Q., Lam, W. H. K., & Shaw, S. L. (2018). Understanding the Impacts of Human Mobility on Accessibility Using Massive Mobile Phone Tracking Data. *Annals of the American Association of Geographers*, 4452, 1–19. <https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1411244>
- Chen, Y., Ravulaparthi, S., Deutsch, K., Dalal, P., Yoon, S., Lei, T., ... Hu, H.-H. (2011).

- Development of Indicators of Opportunity-Based Accessibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2255(2), 58–68. <https://doi.org/10.3141/2255-07>
- Cheng, J., & Bertolini, L. (2013). Measuring urban job accessibility with distance decay, competition and diversity. *Journal of Transport Geography*, 30, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.03.005>
- Chiu, Y.-C., Bottom, J., Mahut, M., Paz, A., Balakrishna, R., Waller, T., & Hicks, J. (2011). *Dynamic Traffic Assignment. A Premier* (Transport Research Circular No. E-C153). Washington, DC (United States of America). Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec153.pdf>
- Christaller, W. (1933). *Central Places in Southern Germany (1966 English edition)*. Englewood Cliffs, N.J. (USA): Prentice-Hall.
- Christidis, P., & Ibáñez Rivas, J. N. (2012). *Measuring road congestion*. Luxembourg (Luxembourg): European Commission. <https://doi.org/10.2791/15282>
- Ciuccarelli, P., Lupi, G., & Simeone, L. (2014). *Visualizing the Data City*. (B. Pernici, S. Della Torre, B. M. Colosimo, T. Faravelli, R. Paolucci, & S. Piardi, Eds.) (First). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02195-9>
- Condeço-Melhorado, A. M., Christidis, P., & Dijkstra, L. (2015). Travel speed changes along the European core road network for the period 1960–2030: an application of octilinear cartograms. *Journal of Maps*, (November), 1–4. <https://doi.org/10.1080/17445647.2015.1088482>
- Condeço-Melhorado, A. M., Gutiérrez, J., & García-Palomares, J. C. (2013). Influence of distance decay on the measurement of spillover effects of transport infrastructure: A sensitivity analysis. *Geofocus*, 13(1), 22–47. Retrieved from http://geofocus.rediris.es/2013/Articulo2_2013_1.pdf
- Condeço-Melhorado, A. M., Martín, J. C., & Gutiérrez, J. (2011). Regional spillovers of transport infrastructure investment: a territorial cohesion analysis. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 11(4), 389–404. Retrieved from http://www.ejtir.tbm.tudelft.nl/ISSUES/2011_04/pdf/2011_04_03.pdf
- Consorcio Regional de Transportes de Madrid. (2005). *Encuesta Domiciliaria de Movilidad 2004 en la Comunidad de Madrid. Documento de síntesis*.
- Cookson, G. (2016). *Europe's Traffic Hotspots*. Retrieved from <http://inrix.com/wp->

- content/uploads/2017/02/INRIX-Europes-Traffic-Hotspots-Research-FINAL-hi-res-1.pdf
- Cookson, G., & Pishue, B. (2017). *The Impact of Parking Pain in the US , UK and Germany*. Retrieved from <http://www2.inrix.com/research-parking-2017>
- Cordera, R., Coppola, P., dell'Olio, L., & Ibeas, Á. (2017). Is accessibility relevant in trip generation? Modelling the interaction between trip generation and accessibility taking into account spatial effects. *Transportation*, 44(6), 1577–1603. <https://doi.org/10.1007/s11116-016-9715-5>
- Crozet, Y. (2017). Appraisal methodologies and the limits to speed gains. *Transportation Research Procedia*, 25, 2902–2916. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.279>
- Curl, A., Nelson, J. D., & Anable, J. (2011). Does Accessibility Planning address what matters? A review of current practice and practitioner perspectives. *Research in Transportation Business & Management*, 2, 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2011.07.001>
- Daganzo, C. F. (1999). Remarks on traffic flow modeling and its applications. In W. Brilon, G. Huber, M. Schreckenberg, & H. Wallentowitz (Eds.), *Traffic and Mobility* (1st ed., pp. 105–115). Berlin (Germany): Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Retrieved from <http://www.ce.berkeley.edu/~daganzo/PAPER.PDF>
- de Abreu e Silva, J., & Goulias, K. G. (2009). Structural Equations Model of Land Use Patterns, Location Choice, and Travel Behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2135, 106–113. <https://doi.org/10.3141/2135-13>
- Dean, B. (2004). *Shortest paths in FIFO time-dependent networks: Theory and algorithms. Rapport technique, Massachusetts Institute of Technology*. Boston. Retrieved from <http://people.csail.mit.edu/bdean/tdsp.pdf>
- Department of Environment, & Department of Transport. (1994). Planning Policy Guidance: Transport (PPG13).
- Department of Transport. (2014). Accessibility Statistics: Travel time calculation methodology. Retrieved from <http://assets.dft.gov.uk/statistics/series/accessibility/accessibility-statistics-methodology.pdf>
- Dewulf, B., Neutens, T., Vanlommel, M., Logghe, S., De Maeyer, P., Witlox, F., ... Van de Weghe, N. (2015). Examining commuting patterns using Floating Car Data and circular statistics: Exploring the use of new methods and visualizations to study travel times. *Journal of Transport Geography*, 48(December), 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.08.006>

- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Dodson, J., & Sipe, N. (2008). Shocking the Suburbs: Urban Location, Homeownership and Oil Vulnerability in the Australian City. *Housing Studies*, 23(3), 377–401. <https://doi.org/10.1080/02673030802015619>
- Dong, X., Ben-Akiva, M. E., Bowman, J. L., & Walker, J. L. (2006). Moving from trip-based to activity-based measures of accessibility. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(2), 163–180. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.05.002>
- Eliasson, K., Lindgren, U., & Westerlund, O. (2003). Geographical Labour Mobility: Migration or Commuting? *Regional Studies*, 37(8), 827–837. <https://doi.org/10.1080/0034340032000128749>
- Erkut, E., Ingolfsson, A., & Erdoğan, G. (2008). Ambulance location for maximum survival. *Naval Research Logistics*, 55(1), 42–58. <https://doi.org/10.1002/nav.20267>
- ESPON. (2006). *The Modifiable Areas Unit Problem. Final Report (ESPON 3.4.3)*. Retrieved from http://www.espon.eu/main/Menu_Projects/Menu_ESPON2006Projects/Menu_StudiesScientificSupportProjects/maup.html
- ESPON. (2014a). ESPON 2013 Database Dictionary of Spatial Units. Retrieved January 20, 2014, from http://database.espon.eu/db2/jsf/DicoSpatialUnits/DicoSpatialUnits_onehtml/index.html
- ESPON. (2014b). NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics. Retrieved January 20, 2014, from http://database.espon.eu/db2/jsf/DicoSpatialUnits/DicoSpatialUnits_html/ch01s01.html
- ESRI. (2014a). About network analysis with hierarchy. Retrieved February 25, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//004700000057000000>. Last accessed on January 21
- ESRI. (2014b). Historical traffic. Retrieved January 27, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//0047000001rs000000>
- ESRI. (2016). Understanding connectivity - ArcGIS 10.4. Retrieved March 20, 2017, from <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/extensions/network-analyst/understanding-connectivity.htm>
- European Commission. (n.d.). NACE rev2 - Statistical Classification of Economic Activities in

- the European Community, Rev. 2. Retrieved September 30, 2014, from http://ec.europa.eu/eurostat/ramon/nomenclatures/index.cfm?TargetUrl=LST_NOM_DTL&StrNom=NACE_REV2&StrLanguageCode=EN&IntPcKey=&StrLayoutCode=HIERARCHIC&CFID=1505519&CFTOKEN=72ade128432278a0-8C677D5A-BCBE-A71A-453E62B48EF6DCAB&jsessionid=ee30c97ea7f3644f7a
- European Commission. (1999). *European spatial development perspective*. (European Comission, Ed.). Luxembourg (Luxembourg): European Communities. Retrieved from http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum_en.pdf
- European Commission. (2012). *Study on Urban Freight Transport*. Brussels (Belgium). Retrieved from <http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/studies/doc/2012-04-urban-freight-transport.pdf>
- European Environment Agency. (2006). *Urban sprawl in Europe - The ignored challenge. EEA report* (Vol. 10). <https://doi.org/10.1080/02697451003740312>
- European Environment Agency. (2007). EEA reference grids. Retrieved January 20, 2014, from 9B755D9F-8B6B-4CE0-9270-0963E10B2FC8
- European Parking Association. (2013). *Scope of Parking in Europe* (Vol. Data Colle). Retrieved from http://www.europeanparking.eu/media/1180/epa_data_collection_rev.pdf
- Eurostat. (2009). Harmonised European time use surveys. Retrieved January 25, 2017, from <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/KS-RA-08-014>
- Eurostat. (2011). Local Administrative Units (LAU). Retrieved January 20, 2014, from http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/nuts_nomenclature/local_administrative_units
- Eurostat. (2012). GEOSTAT. Population Distribution Demography 2006. Retrieved January 20, 2014, from <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/population-distribution-demography/geostat>
- Eurostat. (2016a). GEOSTAT. Population Distribution Demography 2011. Retrieved September 25, 2016, from <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/population-distribution-demography/geostat>
- Eurostat. (2016b). NUTS and LAU national structures EU. Retrieved May 9, 2017, from <http://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/national-structures-eu>
- Eurostat. (2017a). Length of motorways and e-roads [road_if_motorwa]. Retrieved September 12, 2017, from

- http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_if_motorwa&lang=en
- Eurostat. (2017b). Length of other roads by category of roads [road_if_roadsc]. Retrieved September 12, 2017, from http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_if_roadsc&lang=en
- Eurostat. (2017c). Passenger cars per 1 000 inhabitants [road_eqs_carhab]. Retrieved July 12, 2017, from http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_eqs_carhab&lang=en
- Eurostat. (2017d). Road, rail and navigable inland waterways networks by NUTS 2 regions [tran_r_net]. Retrieved September 12, 2017, from http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=tran_r_net&lang=en
- Farber, S., Morang, M. Z., & Widener, M. J. (2014). Temporal variability in transit-based accessibility to supermarkets. *Applied Geography*, 53, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.012>
- Fielbaum, A., Jara-Diaz, S., & Gschwender, A. (2016). A Parametric Description of Cities for the Normative Analysis of Transport Systems. *Networks and Spatial Economics*. <https://doi.org/10.1007/s11067-016-9329-7>
- Fotheringham, A. S., & O'Kelly, M. E. (1989). *Spatial interaction models - formulations and applications*. Springer Netherlands. Retrieved from <http://www.springer.com/br/book/9780792300212>
- Fransen, K., Farber, S., Deruyter, G., & De Maeyer, P. (2017). A spatio-temporal accessibility measure for modelling activity participation in discretionary activities. *Travel Behaviour and Society*, (September), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2017.09.002>
- Fransen, K., Neutens, T., Farber, S., De Maeyer, P., Deruyter, G., & Witlox, F. (2015). Identifying public transport gaps using time-dependent accessibility levels. *Journal of Transport Geography*, 48, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.09.008>
- Frost, M. E., & Spence, N. A. (1995). The rediscovery of accessibility and economic potential: the critical issue of self-potential. *Environment and Planning A*, 27(11), 1833–1848. <https://doi.org/10.1068/a271833>
- Furness, K. P. (1965). Time function iteration. *Traffic Engineering and Control*, 7(7), 458–460.
- Geertman, S. C. M., & Ritsema Van Eck, J. R. (1995). Research article: GIS and models of accessibility potential: An application in planning. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(1), 67–80. <https://doi.org/10.1080/02693799508902025>

- Geurs, K. T., De Montis, A., & Reggiani, A. (2015). Recent advances and applications in accessibility modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, 82–85. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.09.003>
- Geurs, K. T., Patuelli, R., & Dentinho, T. P. (2016). *Accessibility, Equity and Efficiency: Challenges for Transport and Public Services*. (K. T. Geurs, R. Patuelli, & T. P. Dentinho, Eds.). Edward Elgar Publishing Limited.
- Geurs, K. T., & Ritsema van Eck, J. (2001). *Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact*. Bilthoven (Netherlands). Retrieved from <https://rivm.openrepository.com/rivm/handle/10029/9487>
- Geurs, K. T., & Ritsema van Eck, J. (2003). Evaluation of accessibility impacts of land-use scenarios: the implications of job competition, land-use, and infrastructure developments for the Netherlands. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(1), 69–87. <https://doi.org/10.1068/b12940>
- Geurs, K. T., & Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>
- Geurs, K. T., & Van Wee, B. (2006). Ex-post evaluation of thirty years of compact urban development in the Netherlands. *Urban Studies*, 43(1), 139–160. <https://doi.org/10.1080/00420980500409318>
- Gifford, J. L. (2003). *Flexible Urban Transportation*. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Science Ltd. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=660405>
- Google. (2016). GTFS Static Overview. Retrieved May 12, 2017, from <https://developers.google.com/transit/gtfs/?hl=en>
- Google. (2017a). Google Maps API - Política. Retrieved June 12, 2017, from <https://developers.google.com/maps/documentation/directions/policies>
- Google. (2017b). Google Maps API - Tarifas y planes. Retrieved June 12, 2017, from <https://developers.google.com/maps/pricing-and-plans/#details>
- Gospodini, A. (2002). European cities in competition and the new “uses” of urban design. *Journal of Urban Design*, 7(1), 59–73. <https://doi.org/10.1080/13574800220129231>
- Grauwin, S., Sobolevsky, S., Moritz, S., Gódor, I., & Ratti, C. (2015). Towards a comparative science of cities: using mobile traffic records in New York, London, and Hong Kong. In M.

- Helbich, J. Jokar Arsanjani, & M. Leitner (Eds.), *Computational approaches for urban environments* (First, pp. 363–387). Springer International Publishing. Retrieved from <http://www.springer.com/gb/book/9783319114682>
- Greenberg, H. (1959). An Analysis of Traffic Flow. *Operations Research*, 7(1), 79–85. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2775949>
- Greenshields, B. D. (1935). A study of traffic capacity. *14 Annual Meeting of the Highway Research Board Proceedings*. Retrieved from <http://pubsindex.trb.org/view.aspx?id=120649>
- Gunturi, V. M. V., Shekhar, S., & Yang, K. (2015). A Critical-Time-Point Approach to All-Departure-Time Lagrangian Shortest Paths. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 27(10), 2591–2603. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2015.2426701>
- Gutiérrez, J. (2001). Location, economic potential and daily accessibility: An analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid–Barcelona–French border. *Journal of Transport Geography*, 9(4), 229–242. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00017-5)
- Gutiérrez, J., Condeço-Melhorado, A. M., López, E., & Monzón, A. (2011). Evaluating the European added value of TEN-T projects: A methodological proposal based on spatial spillovers, accessibility and GIS. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 840–850. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.10.011>
- Gutiérrez, J., & Urbano, P. (1996). Accessibility in the European Union: the impact of the trans-European road network. *Journal of Transport Geography*, 4(1), 15–25. [https://doi.org/10.1016/0966-6923\(95\)00042-9](https://doi.org/10.1016/0966-6923(95)00042-9)
- Guy, C. (1987). Accessibility to multiple- owned grocery stores in Cardiff: A description and evaluation of recent changes. *Planning Practice and Research*, 1(2), 9–15. <https://doi.org/10.1080/02697458708722666>
- Gwara, B. (2017). *Validation of TomTom historical average speeds on freeway segments in Gauteng, South Africa*. Stellenbosch University.
- Hägerstrand, T. (1970). What about people in Regional Science? *Papers of the Regional Science Association*, 24(1), 6–21. <https://doi.org/10.1007/BF01936872>
- Hall, R. W. (1983). Travel outcome and performance: The effect of uncertainty on accessibility. *Transportation Research Part B*, 17(4), 275–290. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(83\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0191-2615(83)90046-2)
- Handy, S. L. (1993). A cycle of dependence: Automobiles, accessibility, and the evolution of

- the transportation and retail hierarchies. *Berkeley Planning Journal*, 8, 21–43. Retrieved from <http://www.uctc.net/research/papers/233.pdf>
- Handy, S. L. (2002). *Accessibility- Vs. Mobility-Enhancing Strategies for Addressing Automobile Dependence in the U.S. European Conference of Ministers of Transport*. Retrieved from http://www.des.ucdavis.edu/faculty/handy/ECMT_report.pdf
- Handy, S. L. (2005a). Planning for accessibility: in theory and in practice. In D. M. Levinson & K. J. Krizek (Eds.), *Access to Destinations* (1st ed., pp. 131–147). Elsevier Ltd. Retrieved from http://www.des.ucdavis.edu/faculty/handy/Access_chapter.pdf
- Handy, S. L. (2005b). Smart growth and the transportation-land use connection: What does the research tell us? *International Regional Science Review*, 28(2), 146–167. <https://doi.org/10.1177/0160017604273626>
- Handy, S. L., & Niemeier, D. A. (1997). Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives. *Environment and Planning A*, 29(7), 1175–1194. <https://doi.org/10.1068/a291175>
- Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76. <https://doi.org/10.1080/01944365908978307>
- Hanson, S. (1982). The Determinants of Daily Travel-Activity Patterns: Relative Location and Sociodemographic Factors. *Urban Geography*, 3(3), 179–202. <https://doi.org/10.2747/0272-3638.3.3.179>
- Hanson, S., & Schwab, M. (1987). Accessibility and intraurban travel. *Environment and Planning A*, 19(August 1985), 735–748. <https://doi.org/10.1068/a190735>
- Haugen, K., Holm, E., Strömgren, M., Vilhelmson, B., & Westin, K. (2012). Proximity, accessibility and choice: A matter of taste or condition? *Papers in Regional Science*, 91(1), 65–84. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2011.00374.x>
- Helling, A. (1998). Changing intra-metropolitan accessibility in the US: evidence from Atlanta. *Progress in Planning*, 49(2), 55–107. [https://doi.org/10.1016/S0305-9006\(97\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0305-9006(97)00032-9)
- Hodge, D. C. (1997). Accessibility-related issues. *Journal of Transport Geography*, 5(1), 33–34. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(96\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(96)00050-6)
- Holl, A. (2007). Twenty years of accessibility improvements. The case of the Spanish motorway building programme. *Journal of Transport Geography*, 15(4), 286–297. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.09.003>

- Iacono, M., Krizek, K. J., & El-Geneidy, A. (2008). Access to Destinations: How Close is Close Enough? Estimating Accurate Distance Decay Functions for Multiple Modes and Different Purposes, 76. Retrieved from <http://www.lrrb.org/PDF/200811.pdf%5Cnhttp://www.cts.umn.edu/access-study/research/6/index.html>
- IATA. (2014). Airline and Airport Code Search. Retrieved from <http://www.iata.org/publications/Pages/code-search.aspx>
- Illich, I. (1974). *Energy and Equity- Ideas in Progress*. Retrieved from <http://www.w.ridemybike.org/energyandequity.pdf>
- INE. (2004). Population and Housing Census 2001. Retrieved December 10, 2013, from http://www.ine.es/en/censo2001/index_en.html
- INE. (2016). Indicadores para celdas de 1 km². Retrieved May 10, 2016, from http://www.ine.es/censos2011_datos/cen11_datos_resultados_rejillas.htm
- Ingram, D. R. (1971). The concept of accessibility: A search for an operational form. *Regional Studies*, 5(2), 101–107. <https://doi.org/10.1080/09595237100185131>
- INRIX. (2017). INRIX 2016 Global Traffic Scorecard. Retrieved April 3, 2017, from <http://inrix.com/scorecard/>
- International Organization for Standardization. (n.d.). Country Codes - ISO 3166. Retrieved May 16, 2014, from <https://www.iso.org/iso-3166-country-codes.html>
- Islam, M. S., Rahaman, K. R., & Ahmed, S. J. (2008). “Demand of Participants” or “Supply of Opportunities”: Measuring Accessibility of Activity Places Based on Time Geographic Approach. *Journal of Urban Planning and Development*, 134(December), 159–165. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2008\)134:4\(159\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2008)134:4(159))
- ITC - Universiteit Twente. (2011). *Animated cartogram showing train travel time in the Netherlands. the Netherlands (EU): Youtube*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=9Ayj-80e1w0>
- Izquierdo de Bartolomé, R., & Monzón de Cáceres, A. (1992). La accesibilidad a las redes de transporte como instrumento de evaluación de la cohesión económica y social. *TTC: Revista Del Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones*, 56, 33–56.
- Jäppinen, S., Toivonen, T., & Salonen, M. (2013). Modelling the potential effect of shared bicycles on public transport travel times in Greater Helsinki: An open data approach. *Applied Geography*, 43, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.05.010>

- Jedlička, K., Hájek, P., Ježek, J., Kolovský, F., Mildorf, T., Charvát, K., ... Beran, D. (2016). Open Transport Map: open, harmonized dataset of road network. In *AutoCarto 2016* (pp. 72–84). Albuquerque (USA). Retrieved from <http://www.cartogis.org/publications/proceedings.php?year=2016>
- Jenelius, E. (2009). Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability. *Journal of Transport Geography*, 17(3), 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.06.002>
- Jiang, B., Ma, D., Yin, J., & Sandberg, M. (2016). Spatial Distribution of City Tweets and Their Densities. *Geographical Analysis*, 48(3), 337–351. <https://doi.org/10.1111/gean.12096>
- Johansson, B., Klaesson, J., & Olsson, M. (2002). Time distances and labor market integration. *Papers in Regional Science*, 81(3), 305–327. <https://doi.org/10.1007/s101100200000>
- Joseph, A. E., & Bantock, P. R. (1982). Measuring potential physical accessibility to general practitioners in rural areas: A method and case study. *Social Science & Medicine*, 16(1), 85–90. [https://doi.org/10.1016/0277-9536\(82\)90428-2](https://doi.org/10.1016/0277-9536(82)90428-2)
- Kaddoura, I., Kröger, L., & Nagel, K. (2016). User-specific and Dynamic Internalization of Road Traffic Noise Exposures. *Networks and Spatial Economics*, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11067-016-9321-2>
- Karou, S., & Hull, A. (2014). Accessibility modelling: Predicting the impact of planned transport infrastructure on accessibility patterns in Edinburgh, UK. *Journal of Transport Geography*, 35, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.01.002>
- Kawabata, M., & Shen, Q. (2007). Commuting Inequality between Cars and Public Transit: The Case of the San Francisco Bay Area, 1990-2000. *Urban Studies*, 44(9), 1759–1780. <https://doi.org/10.1080/00420980701426616>
- Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM). (2008). *Mobiliteitsbalans 2008 Congestie in perspectief*. (P. Jorritsma, J. Berveling, L. Harms, J. Kolkman, C. Koopmans, M. Lijesen, ... P. Warffemius, Eds.). Den Haag (the Netherlands). Retrieved from <http://www.kimnet.nl/sites/kimnet.nl/files/mobiliteitsbalans-2008.-congestie-in-perspectief.pdf>
- Kirby, H. R. (1970). Normalising factors of the gravity model- an interpretation. *Transportation Research*, 4, 37–50.
- Kitchin, R. (2013). Big data and human geography: Opportunities, challenges and risks. *Dialogues in Human Geography*, 3(3), 262–267.

<https://doi.org/10.1177/2043820613513388>

- Kotavaara, O., Antikainen, H., & Rusanen, J. (2011). Population change and accessibility by road and rail networks: GIS and statistical approach to Finland 1970-2007. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 926–935. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.10.013>
- Kwan, M.-P. (1998). Space-time and integral measures of individual accessibility: A comparative analysis using a point-based framework. *Geographical Analysis*, 30(3), 191–216. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1998.tb00396.x>
- Kwan, M.-P. (1999). Gender and Individual Access to Urban Opportunities: A Study Using Space-Time Measures, (January 2013), 37–41. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Mei-Po_Kwan/publication/292323055_Gender_and_individual_access_to_urban_opportunities_A_study_using_space-time_measures/links/56b210b108ae795dd5c79a06/Gender-and-individual-access-to-urban-opportunities-A-study-using-s
- Kwan, M.-P. (2013). Beyond Space (As We Knew It): Toward Temporally Integrated Geographies of Segregation, Health, and Accessibility. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(5), 1078–1086. <https://doi.org/10.1080/00045608.2013.792177>
- Kwan, M.-P., & Weber, J. (2008). Scale and accessibility: Implications for the analysis of land use–travel interaction. *Applied Geography*, 28(2), 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.002>
- Laatikainen, T., Tenkanen, H., Kyttä, M., & Toivonen, T. (2015). Comparing conventional and PPGIS approaches in measuring equality of access to urban aquatic environments. *Landscape and Urban Planning*, 144, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.004>
- Lei, T. L., & Church, R. L. (2010). Mapping transit-based access: Integrating GIS, routes and schedules. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2), 283–304. <https://doi.org/10.1080/13658810902835404>
- Lenntorp, B. (1976). Paths in space time environments: A time-geographic study of the movement possibilities of individuals. *Lund Studies in Geography*, 44.
- Lenormand, M., Picornell, M., Cantú-Ros, O. G., Tugores, A., Louail, T., Herranz, R., ... Ramasco, J. J. (2014). Cross-checking different sources of mobility information. *PLoS ONE*, 9(8), 30–38. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105184>

- Levine, J., & Garb, Y. (2002). Congestion pricing's conditional promise: Promotion of accessibility or mobility? *Transport Policy*, 9(3), 179–188. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00007-0)
- Levine, J., Merlin, L., & Grengs, J. (2017). Project-level accessibility analysis for land-use planning. *Transport Policy*, 53(August 2016), 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.09.005>
- Levinson, D. M. (1998). Accessibility and the journey to work. *Journal of Transport Geography*, 6(1), 11–21. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(97\)00036-7](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(97)00036-7)
- Levinson, D. M., & Kumar, A. (1994). The rational locator: Why travel times have remained stable? *Journal of the American Planning Association*, 60(3), 319–332. <https://doi.org/10.1080/01944369408975590>
- Levinson, D. M., & Wu, Y. (2005). The rational locator reexamined: Are travel times still stable? *Transportation*, 32(2), 187–202. <https://doi.org/10.1007/s11116-004-5507-4>
- Levinson, D., Marion, B., Owen, A., & Cui, M. (2017). The City is flatter: Changing patterns of job and labor access. *Cities*, 60, 124–138. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.08.002>
- Li, Q., Zhang, T., Wang, H., & Zeng, Z. (2011). Dynamic accessibility mapping using floating car data: A network-constrained density estimation approach. *Journal of Transport Geography*, 19(3), 379–393. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.07.003>
- Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955). On kinematic waves II . A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 229(1178), 317–345. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.205.4695&rep=rep1&type=pdf>
- Litman, T. (2009). *Transportation cost and benefit analysis*. Victoria Transport Policy Institute (Second, Vol. 31). Victoria (Canada). Retrieved from <http://www.vtpi.org/tca/>
- Litman, T. (2014). *Smart congestion relief: comprehensive analysis of traffic congestion costs and congestion reduction benefits*. Transportation Research Board 2012 Annual Meeting. Victoria (Canada): Vitoria Transport Policy Institute. Retrieved from http://www.vtpi.org/cong_relief.pdf
- Longley, P. A., Adnan, M., & Lansley, G. (2015). The geotemporal demographics of twitter usage. *Environment and Planning A*, 47(2), 465–484. <https://doi.org/10.1068/a130122p>
- Lotfi, S., & Koohsari, M. J. (2009). Measuring objective accessibility to neighborhood facilities

- in the city (A case study: Zone 6 in Tehran, Iran). *Cities*, 26(3), 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2009.02.006>
- Louail, T., Lenormand, M., García, O., Picornell, M., Herranz, R., Frías-Martínez, E., ... Barthélemy, M. (2014). From mobile phone data to the spatial structure of cities. *Scientific Reports*, 4, 5276. <https://doi.org/10.1038/srep05276>
- Louf, R., & Barthélemy, M. (2014). How congestion shapes cities: from mobility patterns to scaling. *Scientific Reports*, 4(5561). <https://doi.org/10.1038/srep005561>
- Lucas, K., Van Wee, B., & Maat, K. (2016). A method to evaluate equitable accessibility: combining ethical theories and accessibility-based approaches. *Transportation*, 43(3), 473–490. <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9585-2>
- Luis, J., & Berodia, M. (2006). Dos Modelos de Distribución de Viajes: Modelo de Entropía (Hyman) versus Triproporcional a través de una aplicación en la Ciudad de Concepción (Chile) Application in the city THE City de Concepcion (Chile). *Revista de Obras Públicas*, 3462, 33–40.
- Luo, W., & Wang, F. (2003). Measures of spatial accessibility to health care in a GIS environment: Synthesis and a case study in the Chicago region. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(6), 865–884. <https://doi.org/10.1068/b29120>
- Martens, M. J., & van Griethuysen, S. (1999). *The ABC location policy in the Netherlands*. Retrieved from <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572236303/abc.pdf>
- Martin, D., Jordan, H., & Roderick, P. (2008). Taking the Bus: Incorporating Public Transport Timetable Data into Health Care Accessibility Modelling. *Environment and Planning A*, 40(10), 2510–2525. <https://doi.org/10.1068/a4024>
- Martin, D., Wrigley, H., Barnett, S., & Roderick, P. (2002). Increasing the sophistication of access measurement in a rural healthcare study. *Health and Place*, 8(1), 3–13. [https://doi.org/10.1016/S1353-8292\(01\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S1353-8292(01)00031-4)
- Martínez, L. M., & Viegas, J. M. (2013). A new approach to modelling distance-decay functions for accessibility assessment in transport studies. *Journal of Transport Geography*, 26, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.08.018>
- Martínez, L. M., Viegas, J. M., & Silva, E. A. (2009). A traffic analysis zone definition: A new methodology and algorithm. *Transportation*, 36(5), 581–599. <https://doi.org/10.1007/s11116-009-9214-z>
- Martínez Sanchez-Mateos, H. S., Mohíno Sanz, I., Ureña Francés, J. M., & Trapero Solís, E.

- (2014). Road accessibility and articulation of metropolitan spatial structures: The case of Madrid (Spain). *Journal of Transport Geography*, 37, 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.04.003>
- Mascia, M., Hu, S., Han, K., North, R., van Poppel, M., Theunis, J., ... Litzenberger, M. (2016). Impact of Traffic Management on Black Carbon Emissions: a Microsimulation Study. *Networks and Spatial Economics*, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11067-016-9326-x>
- McGrail, M. R., & Humphreys, J. S. (2009). Measuring spatial accessibility to primary care in rural areas: Improving the effectiveness of the two-step floating catchment area method. *Applied Geography*, 29(4), 533–541. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.12.003>
- McIntosh, J., Trubka, R., Kenworthy, J., & Newman, P. (2014). The role of urban form and transit in city car dependence: Analysis of 26 global cities from 1960 to 2000. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 33, 95–110. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.08.013>
- Milego, R., & Ramos, M. J. (2013). *Disaggregation of socioeconomic data into a regular grid and combination with other types of data* (ESPON). *Technical Report, ESPON*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Disaggregation+of+socioeconomic+data+into+a+regular+grid+and+combination+with+other+types+of+data#0>
- Miller, H. J. (1991). Modelling accessibility using space-time prism concepts within geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(3), 287–301. <https://doi.org/10.1080/02693799108927856>
- Miller, H. J., & Bridwell, S. a. (2009). A Field-Based Theory for Time Geography. *Annals of the Association of American Geographers*, 99(1), 49–75. <https://doi.org/10.1080/00045600802471049>
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2015). *Publieksrapportage Rijkswegennet. 3e periode 2014*. Den Haag (the Netherlands). Retrieved from <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2015/02/12/publieksrapportage-rijkswegennet>
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017). *Publieksrapportage Rijkswegennet. 3e periode 2016. Publieksrapportage Rijkswegennet*. Den Haag (the Netherlands). Retrieved from file:///C:/Users/b o r j a/Downloads/publieksrapportage-rijkswegennet-jaaroverzicht-

2016.pdf

- Møller-Jensen, L., Kofie, R. Y., & Allotey, A. N. M. (2012). Measuring accessibility and congestion in Accra. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 66(1), 52–60. <https://doi.org/10.1080/00291951.2011.644322>
- Mondschein, A., & Taylor, B. D. (2017). Is traffic congestion overrated? Examining the highly variable effects of congestion on travel and accessibility. *Journal of Transport Geography*, 64(August), 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.08.007>
- Morris, J. M., Dumble, P. L., & Wigan, M. R. (1979). Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research Part A: General*, 13(2), 91–109. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(79\)90012-8](https://doi.org/10.1016/0191-2607(79)90012-8)
- Moya-Gómez, B., & García-Palomares, J. C. (2015). Working with the daily variation in infrastructure performance on territorial accessibility. The cases of Madrid and Barcelona. *European Transport Research Review*, 7(2), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0168-2>
- Moya-Gómez, B., & García-Palomares, J. C. (2017a). The daily dynamic potential accessibility by car in London on Wednesdays. *Journal of Maps*, 13(1), 31–39. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1305301>
- Moya-Gómez, B., & García-Palomares, J. C. (2017b). The impacts of congestion on automobile accessibility. What happens in large European cities? *Journal of Transport Geography*, 62, 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.05.014>
- Moya-Gómez, B., & Geurs, K. T. (n.d.). The spatial-temporal dynamics in job accessibility by car in the Netherlands during the crisis: Impacts of infrastructure investments, congestion, and the spatial developments for 2009-2014. *Regional Studies*.
- Moya-Gómez, B., Salas-Olmedo, M. H., García-Palomares, J. C., & Gutiérrez, J. (2017). Dynamic Accessibility using Big Data: The Role of the Changing Conditions of Network Congestion and Destination Attractiveness. *Networks and Spatial Economics*. <https://doi.org/10.1007/s11067-017-9348-z>
- Murthy, D. (2013). *Twitter: Social Communication in Twitter Age* (First). Cambridge (United Kingdom): John Wiley & Sons.
- Netto, V. M., Pinheiro, M., Meirelles, J. V., & Leite, H. (2015). Digital footprints in the cityscape: Finding networks of segregation through Big Data. In *International Conference on Location-Based Social Media Data* (pp. 1–15). Athens (United States of America).

- Neutens, T. (2015). Accessibility, equity and health care: Review and research directions for transport geographers. *Journal of Transport Geography*, 43, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.12.006>
- Neutens, T., Delafontaine, M., Schwanen, T., & van de Weghe, N. (2012). The relationship between opening hours and accessibility of public service delivery. *Journal of Transport Geography*, 25, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.03.004>
- Neutens, T., Schwanen, T., & Witlox, F. (2011). The prism of everyday life: Towards a new research agenda for time geography. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 31(1), 25–47. <https://doi.org/10.1080/01441647.2010.484153>
- Newton, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica*. London (the United Kingdom).
- OECD. (1999). *Traffic congestion in Europe. Road Table Report*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Traffic+Congestion+in+Europe#1>
- Openshaw, S., & Taylor, P. J. (1981). The modifiable areal unit problem. In N. Wrigley & R. Bennett (Eds.), *Quantitative Geography: A British View* (pp. 60–69). London (the United Kingdom): Routledge and Kegan Paul.
- OpenStreetMap Foundation. (2005). Open Street Map. Retrieved November 9, 2014, from <http://www.openstreetmap.org/about>
- Ortega, E., Quintana, S. M., & Pastor, I. O. (2011). Road and railway accessibility atlas of Spain. *Journal of Maps*, 7(1), 31–41. <https://doi.org/10.4113/jom.2011.1167>
- Ortúzar, J. D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport* (4th ed.). West Sussex (United Kingdom): John Wiley & Sons. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=410941>
- Östh, J. (2011). Introducing a Method for the Computation of Doubly Constrained Accessibility Models in Larger Datasets. *Networks and Spatial Economics*, 11(4), 581–620. <https://doi.org/10.1007/s11067-010-9129-4>
- Östh, J., Lyhagen, J., & Reggiani, A. (2016). A new way of determining distance decay parameters in spatial interaction models with application to job accessibility analysis in Sweden. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 16(2), 344–363.
- Owen, A., & Levinson, D. (2014). *Access Across America: Transit 2014*. Minneapolis (Minnesota - United States of America).

- Owen, A., & Levinson, D. M. (2015). Modeling the commute mode share of transit using continuous accessibility to jobs. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 74, 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.02.002>
- Owen, A., Levinson, D., Owen, A., & Murphy, B. (2016). Access Across America : Auto 2015.
- Páez, A., Moniruzzaman, M., Bourbonnais, P. L., & Morency, C. (2013). Developing a web-based accessibility calculator prototype for the Greater Montreal Area. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 58, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.020>
- Páez, A., Scott, D. M., & Morency, C. (2012). Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators. *Journal of Transport Geography*, 25, 141–153. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016>
- Paresi, M., Melchiorri, M., Siragusa, A., & Kemper, T. (2016). *Atlas of the Human Planet 2016: Mapping Human Presence on Earth with the Global Human Settlement Layer*. <https://doi.org/10.2788/582834>
- Peifer, H. (2011). About the EEA reference grid. Retrieved from http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eea-reference-grids-2/about-the-eea-reference-grid/eea_reference_grid_v1.pdf
- Pipes, L. A. (1953). An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *Journal of Applied Physics*, 24(3), 274–281. <https://doi.org/10.1063/1.1721265>
- Pirie, G. H. (1979). Measuring accessibility : a review and proposal. *Environment and Planning A*, 11, 299–312. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.477.2922&rep=rep1&type=pdf>
- Primerano, F., Taylor, M. A. P., Pitaksringkarn, L., & Tisato, P. (2008). Defining and understanding trip chaining behaviour. *Transportation*, 35(1), 55–72. <https://doi.org/10.1007/s11116-007-9134-8>
- Qpark. (2014). EU car parking market. Retrieved from https://www.q-park.com/xmlpages/tan/files?p_file_id=86
- Quiroga, C. A. (2000). Performance measures and data requirements for congestion management systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8(1–6), 287–306. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00008-5](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00008-5)
- Ramsay, J., & Silverman, B. W. (2006). *Functional Data Analysis*. Retrieved from

http://books.google.com/books?id=REzuyz_V6OQC&pgis=1

- Ran, B. I. N., Boyce, D. E., & Leblanc, L. J. (1993). A New Class of Instantaneous Dynamic User-Optimal Traffic Assignment Models. *Operations Research*, 41(1), 192–202.
- Ratti, C., Frenchman, D., Pulselli, R. M., & Williams, S. (2006). Mobile landscapes: Using location data from cell phones for urban analysis. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5), 727–748. <https://doi.org/10.1068/b32047>
- Raubal, M., Miller, H. J., & Bridwell, S. (2004). User-Centred Time Geography for Location-Based Services. *Geografiska Annaler, Series B: Human Geography*, 86(4), 245–265. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3684.2004.00166.x>
- Reades, J., Calabrese, F., & Ratti, C. (2009). Eigenplaces: Analysing cities using the space - Time structure of the mobile phone network. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(5), 824–836. <https://doi.org/10.1068/b34133t>
- Reggiani, A. (1999). *Accessibility, Trade and Location Behaviour*. Ashgate Publishing Limited.
- Reggiani, A., Bucci, P., & Russo, G. (2011a). Accessibility and Impedance Forms: Empirical Applications to the German Commuting Network. *International Regional Science Review*, 34(2), 230–252. <https://doi.org/10.1177/0160017610387296>
- Reggiani, A., Bucci, P., & Russo, G. (2011b). Accessibility and Network Structures in the German Commuting. *Networks and Spatial Economics*, 11(4), 621–641. <https://doi.org/10.1007/s11067-010-9149-0>
- Reggiani, A., Bucci, P., Russo, G., Haas, A., & Nijkamp, P. (2011). Regional labour markets and job accessibility in City Network systems in Germany. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 528–536. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.05.008>
- Reggiani, A., & Martín, J. C. (2011). Guest Editorial: New Frontiers in Accessibility Modelling: An Introduction. *Networks and Spatial Economics*, 11(4), 577–580. <https://doi.org/10.1007/s11067-011-9155-x>
- Reyes, M., Páez, A., & Morency, C. (2014). Walking accessibility to urban parks by children: A case study of Montreal. *Landscape and Urban Planning*, 125, 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.002>
- Rich, D. C. (1975). *Accessibility and Economic Activity: A Study of Locational Disadvantage in Scotland*. University of Cambridge.
- Richards, P. I. (1956). Shock Waves on the Highway. *Operations Research*, 4(1), 42–51.

Retrieved from
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.205.4695&rep=rep1&type=pdf>

- Ritsema van Eck, J. ., & de Jong, T. (1999). Accessibility analysis and spatial competition effects in the context of GIS-supported service location planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23(2), 75–89. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(99\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(99)00016-2)
- Rode, P., Floater, G., Thomopoulos, N., Docherty, J., Schwinger, P., Mahendra, A., ... Slavcheva, R. (2014). *Accessibility in Cities: Transport and Urban Form*. London (the United Kingdom). Retrieved from <http://files.lsecities.net/files/2014/11/LSE-Cities-2014-Transport-and-Urban-Form-NCE-Cities-Paper-03.pdf>
- Rojas, C., Páez, A., Barbosa, O., & Carrasco, J. (2016). Accessibility to urban green spaces in Chilean cities using adaptive thresholds. *Journal of Transport Geography*, 57, 227–240. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.10.012>
- Rosik, P., Stepniak, M., & Komornicki, T. (2015). The decade of the big push to roads in Poland: Impact on improvement in accessibility and territorial cohesion from a policy perspective. *Transport Policy*, 37, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.10.007>
- Ross, W. (2000). Mobility & Accessibility: The yin & yang of planning. *World Transport Policy and Practice*, 6, 13–19.
- Safirova, E., Gillingham, K., & Houde, S. (2007). Measuring marginal congestion costs of urban transportation: Do networks matter? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(8), 734–749. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.12.002>
- Salas-Olmedo, M. H., García, P., & Gutiérrez, J. (2015). Accessibility and transport infrastructure improvement assessment: The role of borders and multilateral resistance. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 82, 110–129. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.09.009>
- Salas-Olmedo, M. H., & Rojas Quezada, C. (2017). The use of public spaces in a medium-sized city: from Twitter data to mobility patterns. *Journal of Maps*, 13(1), 40–45. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1305302>
- Salomon, I., & Mokhtarian, P. L. (1998). What happens when mobility-inclined market segments face accessibility-enhancing policies? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 3(3), 129–140. <https://doi.org/10.1016/S1361->

9209(97)00038-2

- Salonen, M., & Toivonen, T. (2013). Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport. *Journal of Transport Geography*, 31, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.06.011>
- Schrank, D., Eisele, B., & Lomax, T. (2012). TTI's 2012 urban mobility report. Retrieved April 25, 2014, from <http://d2dtl5nnlpfr0r.cloudfront.net/tti.tamu.edu/documents/mobility-report-2012.pdf>
- Schürmann, C., & Talaat, A. (2000). *Towards a European peripherality index*. Dortmund (Germany). Retrieved from <http://www.raumplanung.tu-dortmund.de/irpud/pro/struktur/ber41.pdf>
- Schürmann, C., Wegener, M., & Fürst, F. (1999). *Accessibility Indicators*. Dortmund (Germany). Retrieved from http://www.spiekermann-wegener.com/pub/pdf/IRPUD_Ber39.pdf
- Selvin, H. C. (1958). Durkheim's Suicide and Problems of Empirical Research. *American Journal of Sociology*, 63(6), 607–619. Retrieved from www.jstor.org/stable/2772991
- Sheffi, Y. (1985). *Urban transportation networks*. Englewood Cliffs (United States of America): Prentice-Hall. Retrieved from http://web.mit.edu/sheffi/www/selectedMedia/sheffi_urban_trans_networks.pdf
- Shelton, T., Poorthuis, A., & Zook, M. (2015). Social media and the city: Rethinking urban socio-spatial inequality using user-generated geographic information. *Landscape and Urban Planning*, 142, 198–211. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.020>
- Shimizu, E., & Inoue, R. (2009). A new algorithm for distance cartogram construction. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(11), 1453–1470. <https://doi.org/10.1080/13658810802186882>
- Shoup, D. C. (2006). Cruising for parking. *Transport Policy*, 13(6), 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.05.005>
- Shrewsbury, J. (2012). *Calibration of trip distribution by generalised linear models* (NZ Transport Agency). Retrieved from <http://www.nzta.govt.nz/resources/research/reports/473/docs/473.pdf>
- Silva, C. (2013). Structural accessibility for mobility management. *Progress in Planning*, 81, 1–49. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2012.07.001>

- Sim, A., Yaliraki, S. N., Barahona, M., & Stumpf, M. P. H. (2015). Great cities look small. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(109). <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0315>
- Skov-Petersen, H. (2001). Estimation of distance-decay parameters-GIS-based indicators of recreational accessibility. *ScanGIS*, 237–258. <https://doi.org/10.1.1.5.6180>
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (1994). The shrinking continent: new time - space maps of Europe. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21(6), 653–673. <https://doi.org/10.1068/b210653>
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (1996). Trans-European Networks and Unequal Accessibility. *European Journal of Regional Development*, 4(96), 35–42.
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (1999). Freedom from the Tyranny of Zones : Towards New GIS-based Spatial Models. In A. S. Fotheringham & M. Wegener (Eds.), *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models* (pp. 45–61). London (the United Kingdom): Taylor and Francis.
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (2006). Accessibility and spatial development in Europe. *Scienze Regionali*, 5(January 2006). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Michael_Wegener3/publication/254415069_Accessibility_and_spatial_Development_in_Europe/links/0a85e534f91641b4c1000000.pdf
- Statistics Netherlands. (n.d.). SBI 2008 - Standaard Bedrijfsindeling 2008. Retrieved September 24, 2014, from <https://www.cbs.nl/nl-nl/onze-diensten/methoden/classificaties/activiteiten/standaard-bedrijfsindeling--sbi--/sbi-2008-standaard-bedrijfsindeling-2008>
- Statistics Netherlands. (2011). Onderzoek Verplaatsingen in Nederland (OVIN). Retrieved October 15, 2014, from <https://www.cbs.nl/nl-nl/onze-diensten/methoden/onderzoeksomschrijvingen/korte-onderzoeksbeschrijvingen/onderzoek-verplaatsingen-in-nederland--ovin-->
- Statistics Netherlands. (2015). Kaart met statistieken per vierkant van 100 bij 100 meter. Retrieved October 22, 2015, from <http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/themas/dossiers/nederland-regionaal/publicaties/geografische-data/archief/2014/2013-kaart-vierkanten-art.htm>
- Statistics Netherlands. (2017a). Arbeidsdeelname; kerncijfers. Retrieved December 11, 2017, from <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/82309NED/table?ts=1517507849657>

- Statistics Netherlands. (2017b). Personenmobiliteit in Nederland; vervoerwijzen en reismotieven, regio's. Retrieved December 11, 2017, from <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83500NED/table?ts=1517506326106>
- Statistics Netherlands. (2017c). Verkeersprestaties motorvoertuigen; kilometers, voertuigsoort, grondgebied. Retrieved December 11, 2017, from <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/80302ned/table?ts=1517507530633>
- Statistics Netherlands. (2018). Verkeersintensiteit; rijkswegen. Retrieved February 2, 2018, from <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=82855ned&D1=0&D2=2&D3=12,25,38,51,64,77,I&HDR=T,G2&STB=G1&VW=T>
- Stępnia, M., & Jacobs-Crisioni, C. (2017). Reducing the uncertainty induced by spatial aggregation in accessibility and spatial interaction applications. *Journal of Transport Geography*, 61(March), 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.04.001>
- Stępnia, M., & Rosik, P. (2017). The Role of Transport and Population Components in Change in Accessibility: the Influence of the Distance Decay Parameter. *Networks and Spatial Economics*, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11067-017-9376-8>
- Stichting LISA. (2016). Landelijk InformatieSysteem van Arbeidsplaatsen (LISA) 2009-2014. Retrieved from <https://www.lisa.nl/home>
- Stopher, P. R. (2004). Reducing road congestion: a reality check. *Transport Policy*, 11(2), 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2003.09.002>
- Straatemeier, T. (2008). How to plan for regional accessibility? *Transport Policy*, 15(2), 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.002>
- Sweet, M. N. (2011). Does Traffic Congestion Slow the Economy? *Journal of Planning Literature*, 26(4), 391–404. <https://doi.org/10.1177/0885412211409754>
- Sweet, M. N. (2014). Do firms flee traffic congestion? *Journal of Transport Geography*, 35, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.01.005>
- Sweet, M. N., Harrison, C. J., & Kanaroglou, P. S. (2015). Gridlock in the Greater Toronto Area: Its geography and intensity during key periods. *Applied Geography*, 58, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.011>
- Sweet, R. J. (1997). An aggregate measure of travel utility. *Transportation Research Part B: Methodological*, 31(5), 403–416. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(97\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(97)00004-0)

- Talen, E., & Anselin, L. (1998). Assessing spatial equity: An evaluation of measures of accessibility to public playgrounds. *Environment and Planning A*, 30(4), 595–613. <https://doi.org/10.1068/a300595>
- Tanner, J. C. (1961). *Factors affecting the amount of travel*. HM Stationery Office.
- Taylor, B. D. (2004). The politics of congestion mitigation. *Transport Policy*, 11(3), 299–302. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.04.001>
- Taylor, P. J. (1975). Distance decay in spatial interactions.
- Thill, J.-C., & Kim, M. (2005). Trip making, induced travel demand, and accessibility. *Journal of Geographical Systems*, 7(2), 229–248. <https://doi.org/10.1007/s10109-005-0158-3>
- Thill, J.-C., & Thomas, I. (1987). Toward Conceptualizing Trip-Chaining Behavior: A review. *Geographical Analysis*, 19(1), 1–17. Retrieved from https://ac.els-cdn.com/S0924224497010510/1-s2.0-S0924224497010510-main.pdf?_tid=daf84a2-10a0-11e8-b5cf-00000aacb35f&acdnat=1518514549_12e94f0c8ba01fcbb71fc2c3c52f3bef
- Thorsen, I., Ubøe, J., & Nævdal, G. (1999). A network approach to commuting. *Journal of Regional Science*, 39(1), 73–101. <https://doi.org/10.1111/1467-9787.00124>
- Tilahun, N., Yin, S., Li, M., & Keita, Y. (n.d.). Mapping Metropolitan Chicago's Accessibility. Retrieved April 25, 2016, from <http://urbanaccessibility.com/accessibility/>
- Timmermans, H., van der Waerden, P., Alves, M., Polak, J., Ellis, S., Harvey, A. S., ... Zandee, R. (2003). Spatial context and the complexity of daily travel patterns: An international comparison. *Journal of Transport Geography*, 11(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(02\)00050-9](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(02)00050-9)
- Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46, 234. <https://doi.org/10.2307/143141>
- TomTom. (2008). *EP 2963389 A1*. Retrieved from <https://encrypted.google.com/patents/EP2963389A1?cl=en>
- TomTom. (2013a). Speed Profiles. Retrieved January 20, 2014, from http://www.tomtom.com/en_gb/licensing/products/traffic/historical-traffic/speed-profiles/#tab:tab1
- TomTom. (2013b). *TomTom European traffic index*. Retrieved from [http://www.tomtom.com/lib/doc/trafficindex/2013-0129-TomTom Congestion-Index-](http://www.tomtom.com/lib/doc/trafficindex/2013-0129-TomTom%20Congestion-Index-)

2012Q3europe-km.pdf

TomTom. (2015a). *Historical Traffic Information*. The Netherlands.

TomTom. (2015b). MultiNet(r) Shapefile - Format Specification 4.8. Retrieved from http://gis.mtc.ca.gov/home/tomtom/multinet_shp_4-8_fs_v1-1-7.pdf

TomTom. (2017). TomTom Traffic Index. Retrieved August 4, 2017, from https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/list?citySize=LARGE&continent=ALL&country=ALL

TRB. (2000). *Highway capacity manual*. TRB. Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/rpo/rpo.trn129.pdf>

Turok, I., & Mykhnenko, V. (2007). The trajectories of European cities, 1960–2005. *Cities*, 24(3), 165–182. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2007.01.007>

Turró, M., & Ulled, A. (1990). Modelo de evaluación de la accesibilidad regional. Aplicación a la cuenca del mediterráneo. In *XVI Reunión de Estudios Regionales. AEER*. San Sebastian (Spain).

Ullah, R., & Kraak, M.-J. (2014). An alternative method to constructing time cartograms for the visual representation of scheduled movement data. *Journal of Maps*, (July 2014), 1–14. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.935502>

UN HABITAT. (2013). *Planing and design for sustainable urban mobility. Global Report on Human Settlement 2013*. New York, NY (United States of America): United Nations. Retrieved from <http://unhabitat.org/planning-and-design-for-sustainable-urban-mobility-global-report-on-human-settlements-2013/>

Underwood, R. T. (1969). Speed, volume, and density relationships: Quality and theory of traffic flow. In *Yale Bureau of Highway Traffic* (pp. 141–188).

Vale, D. S., Saraiva, M., & Pereira, M. (2015). Active accessibility: A review of operational measures of walking and cycling accessibility. *Journal of Transport and Land Use*, 1, 1–27. <https://doi.org/10.5198/jlu.2015.593>

van Eggermond, M. A. B., & Erath, A. (2015). Pedestrian and transit accessibility on a micro level: results and challenges. *Journal of Transport and Land Use*, 9(3). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5198/jtlu.2015.677>

van Wageningen-Kessels, F., van Lint, H., Vuik, K., & Hoogendoorn, S. (2015). Genealogy of traffic flow models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(4), 445–473.

<https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>

- Van Wee, B. (2016). Accessible accessibility research challenges. *Journal of Transport Geography*, 51, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018>
- Van Wee, B., Hagoort, M., & Annema, J. a. (2001). Accessibility measures with competition. *Journal of Transport Geography*, 9(3), 199–208. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00010-2)
- Vandenbulcke, G., Steenberghen, T., & Thomas, I. (2009). Mapping accessibility in Belgium: A tool for land-use and transport planning? *Journal of Transport Geography*, 17(1), 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008>
- Vickerman, R. W. (1974). Accessibility, attraction, and potential: a review of some concepts and their use in determining mobility. *Environment and Planning A*, 6(6), 675–691. <https://doi.org/10.1068/a060675>
- Von Thünen, J. E. (1826). *The isolated state (1966 English edition)*. Pergamon Press.
- Vries, J. De, Nijkamp, P., & Rietveld, P. (2001). Alonso's theory of movements: Developments in spatial interaction modeling. *Journal of Geographical Systems*, 3(3), 233–256. <https://doi.org/10.1007/PL00011478>
- Wardrop, J. G. (1952). Road Paper. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. In *ICE Proceedings: Engineering Divisions* (Vol. 1, pp. 325–378). London (the United Kingdom). Retrieved from <https://goo.gl/TcYRk1>
- Weber, A. (1909). *Theory of the Location of Industries (1929 English edition)*. University of Chicago Press.
- Weber, J. (2003). Individual accessibility and distance from major employment centers: An examination using space-time measures. *Journal of Geographical Systems*, 5(1), 51–70. <https://doi.org/10.1007/s101090300103>
- Weber, J., & Kwan, M.-P. (2002). Bringing time back in : A study on the influence on individual accessibility. *The Professional Geographer*, 54(2), 226–240. <https://doi.org/10.1111/0033-0124.00328>
- Weibull, J. W. (1976). An axiomatic approach to the measurement of accessibility. *Regional Science and Urban Economics*, 6, 357–379. [https://doi.org/10.1016/0166-0462\(76\)90031-4](https://doi.org/10.1016/0166-0462(76)90031-4)
- Wheaton, W. C. (1998). Land use and density in cities with congestion. *Journal of Urban*

- Economics*, 43(2), 258–272. <https://doi.org/10.1006/juec.1997.2043>
- Wilson, A. (1971). Family of spatial interaction models, and associated developments. *Environment and Planning*, 3(1), 1–32. <https://doi.org/10.1068/a030001>
- Wilson, A. (2010). Entropy in urban and regional modelling: Retrospect and prospect. *Geographical Analysis*, 42(4), 364–394. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2010.00799.x>
- Wu, L., Zhi, Y., Sui, Z., & Liu, Y. (2014). Intra-urban human mobility and activity transition: Evidence from social media check-in data. *PLoS ONE*, 9(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097010>
- Wu, Y.-H., & Miller, H. J. (2002). Computational tools for measuring space-time accessibility within transportation networks with dynamic flow. *Journal of Transportation and Statistics*, 4(2/3), 1–14. Retrieved from http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/files/publications/journal_of_transportation_and_statistics/volume_04_number_23/paper_01/index.html
- Wu, Y.-H., Miller, H. J., & Hung, M.-C. (2001). A GIS-based decision support system for analysis of route choice in congested urban road networks. *Journal of Geographical Systems*, 3(1), 3–24. <https://doi.org/10.1007/PL00011466>
- Yang, X., Ban, X. J., & Ma, R. (2016). Mixed Equilibria with Common Constraints on Transportation Networks. *Networks and Spatial Economics*. <https://doi.org/10.1007/s11067-016-9335-9>
- Yiannakoulias, N., Bland, W., & Svenson, L. W. (2013). Estimating the effect of turn penalties and traffic congestion on measuring spatial accessibility to primary health care. *Applied Geography*, 39, 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.003>
- Zhan, X., Ukkusuri, S. V., & Zhu, F. (2014). Inferring Urban Land Use Using Large-Scale Social Media Check-in Data. *Networks and Spatial Economics*, 14(3–4), 647–667. <https://doi.org/10.1007/s11067-014-9264-4>
- Zhu, X., & Liu, S. (2004). Analysis of the impact of the MRT system on accessibility in Singapore using an integrated GIS tool. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.003>

Anexo A. Fichas de las áreas de estudio

En la tabla A.1. se muestran el ranking de las dotaciones unitarias de carreteras de mayor categoría para cada uno de las áreas de estudio de la tesis.

	km FRC 0-1 por 1.000 hab.	km FRC 0-1 por km ²
1	Países Bajos 2014	Madrid
2	Países Bajos 2011	París
3	Hamburgo	Berlín
4	Madrid	Barcelona
5	Randstad 2014	Hamburgo
6	Berlín	Randstad 2014
7	Randstad 2011	Randstad 2011
8	París	Roma
9	Roma	Milán
10	Barcelona	Londres
11	Milán	Países Bajos 2014
12	Londres	Países Bajos 2011

Tabla A.1. Ranking de las áreas de estudio según su dotación de autopistas y otras carreteras primarias (FRC 0) y carreteras primarias con características inferiores a autopista (FRC 1) para cada 1.000 habitantes y para km². Fuente: TomTom®, Eurostat, y CBS.

Ecuaciones utilizadas para el cálculo de velocidades indicadas en las fichas de las ciudades (Ecuación A.1a. y Ecuación A.1b.)

$$\bar{v}^P = \frac{\sum_{dt \in P} \left(\frac{\sum_{i \in N} o_i \cdot \left(\frac{\sum_{j \in N} d_j \cdot \left(\frac{dist_{ij}^{dt}}{c_{ij}^{dt}} \right)}{\sum_{j \in N} d_j} \right)}{\sum_{i \in N} o_i} \right)}{|dt \in P|} \quad (\text{Ec. A.1a})$$

$$v_{med}^P = \text{mediana} \left(\frac{\sum_{i \in N} o_i \cdot \left(\frac{\sum_{j \in N} d_j \cdot \left(\frac{dist_{ij}^{dt}}{c_{ij}^{dt}} \right)}{\sum_{j \in N} d_j} \right)}{\sum_{i \in N} o_i}, \dots, \frac{\sum_{i \in N} o_i \cdot \left(\frac{\sum_{j \in N} d_j \cdot \left(\frac{dist_{ij}^{dt}}{c_{ij}^{dt}} \right)}{\sum_{j \in N} d_j} \right)}{\sum_{i \in N} o_i} \right) \quad (\text{Ec. A.1b})$$

En donde, \bar{v}^P es velocidad media observada ponderadas por el peso de la zona origen i -ésima y de la zona destino j -ésima para un periodo P , v_{med}^P es velocidad mediana para un periodo P , o_i es el valor de la zona i -ésima, d_j es el valor de las oportunidades en la zona j -ésima, c_{ij}^{dt} es el valor de la impedancia total (tiempo de viaje) para ir de la zona i -ésima a la zona j -ésima, habiendo salido de la zona i -ésima a una determinada hora (dt), $dist_{ij}^{dt}$ es el valor de la distancia recorrida para ir de la zona i -ésima a la zona j -ésima, habiendo salido de la zona i -ésima a una determinada hora (dt) por el camino de menor tiempo de viaje, dt es la hora de salida de cada relación, N es el conjunto de zonas dentro de la zona de estudio, y P es el conjunto de periodos de estudio.

Las unidades de c_{ij}^{dt} y $dist_{ij}^{dt}$ deben ser consecuentes para obtener una medida de velocidad. En este caso se usa [h] para c_{ij}^{dt} , y [km] para $dist_{ij}^{dt}$.

Los datos mostrados en las fichas corresponden periodos de captación y presentación de los datos mostrados en la tabla A.2.

Pa- is	Fichas	2009				2010				2011				2012				2013				2014			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
DE	BER, HAM									C	C	C	C	C	C	C	C	E							
ES	MAD, BCN									C	C	C	C	C	C	C	C	E							
FR	PAR									C	C	C	C	C	C	C	C	E							
GB	LON									C	C	C	C	C	C	C	C	E							
IT	ROM, MIL									C	C	C	C	C	C	C	C	E							
NL 11	NL11, RAND11			C	C	C	C	C	C	C	C	E													
NL 14	NL14, RAND14															C	C	C	C	C	C	C	C	E	

Tabla A.2. Cronograma de la captación de datos de velocidades mostradas en cada ficha del anexo A (C = Captación, E = Entrega y geografía de la red según MultiNet®).

La velocidad en flujo libre mostrada en estas fichas es la mínima entre la velocidad legal y la velocidad observada. Se ha requerido realizar esta simplificación para cumplir con condiciones de uso de los datos por parte de TomTom y evitar que sus datos puedan ser usados para la toma de decisiones relacionada con la ubicación de radares, entre otros.

Fuente de datos usadas en este anexo

Eurostat. (2016). GEOSTAT. Population Distribution Demography 2011. Retrieved September 25, 2016, from <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/population-distribution-demography/geostat>

Statistics Netherlands. (2015). Kaart met statistieken per vierkant van 100 bij 100 meter. Retrieved October 22, 2015, from <http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/themas/dossiers/nederland-regionaal/publicaties/geografische-data/archief/2014/2013-kaart-vierkanten-art.htm>

Stichting LISA. (2016). Landelijk InformatieSysteem van Arbeidsplaatsen (LISA) 2009-2014. Retrieved from <https://www.lisa.nl/home>

TomTom. (2015). Historical Traffic Information. The Netherlands.

Población en área de estudio (2011): 12.600.686 hab.
Superficie del área de estudio: 6.432 km²

Población en área de estudio (2011): 12.600.686 hab.
Superficie del área de estudio: 6.432 km²

Centro ciudad

Carreteras principales (FRC* 0 - 3)

Fronteras del país

Área de estudio

Ciudad principal

NUTS3 - versión 2011

0 hab.

1 hab. - 2.000 hab.

2.001 hab. - 10.000 hab.

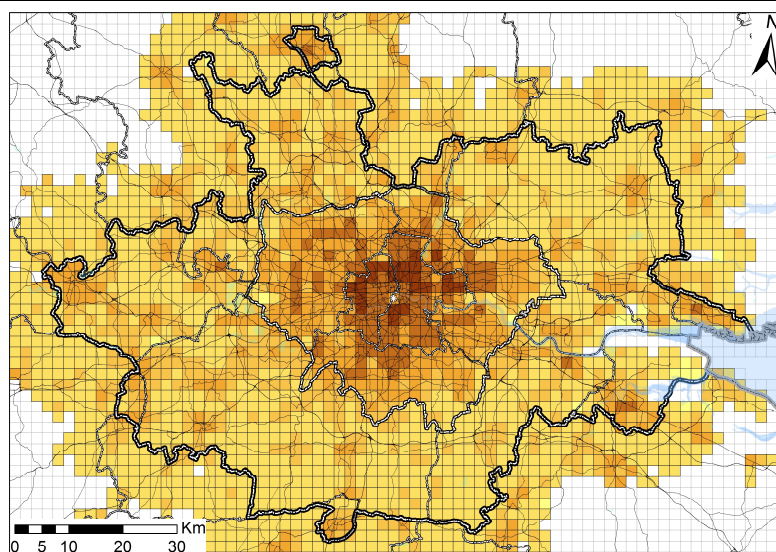
10.001 hab. - 25.000 hab.

25.001 hab. - 50.000 hab.

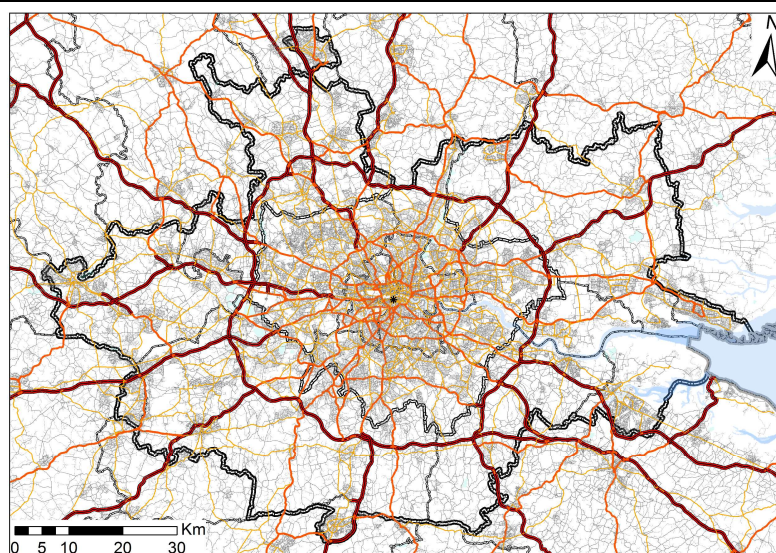
50.001 hab. - 100.000 hab.

≥ 100.001 hab.

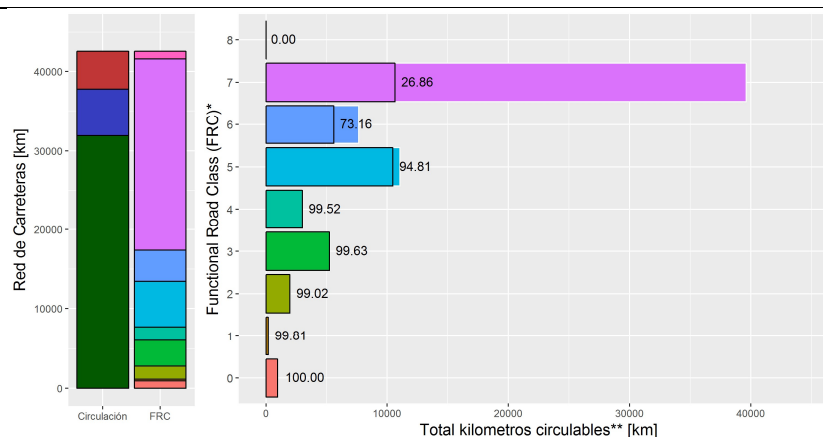
Zonas no incluidas en el área de cálculo



* Centro ciudad
 Fronteras del país
 Área de estudio
 Ciudad principal
 NUTS3 - versión 2011
FRC*
 FRC 0 - 1
 FRC 2
 FRC 3
 FRC 4 - 6
 FRC 7 - 8

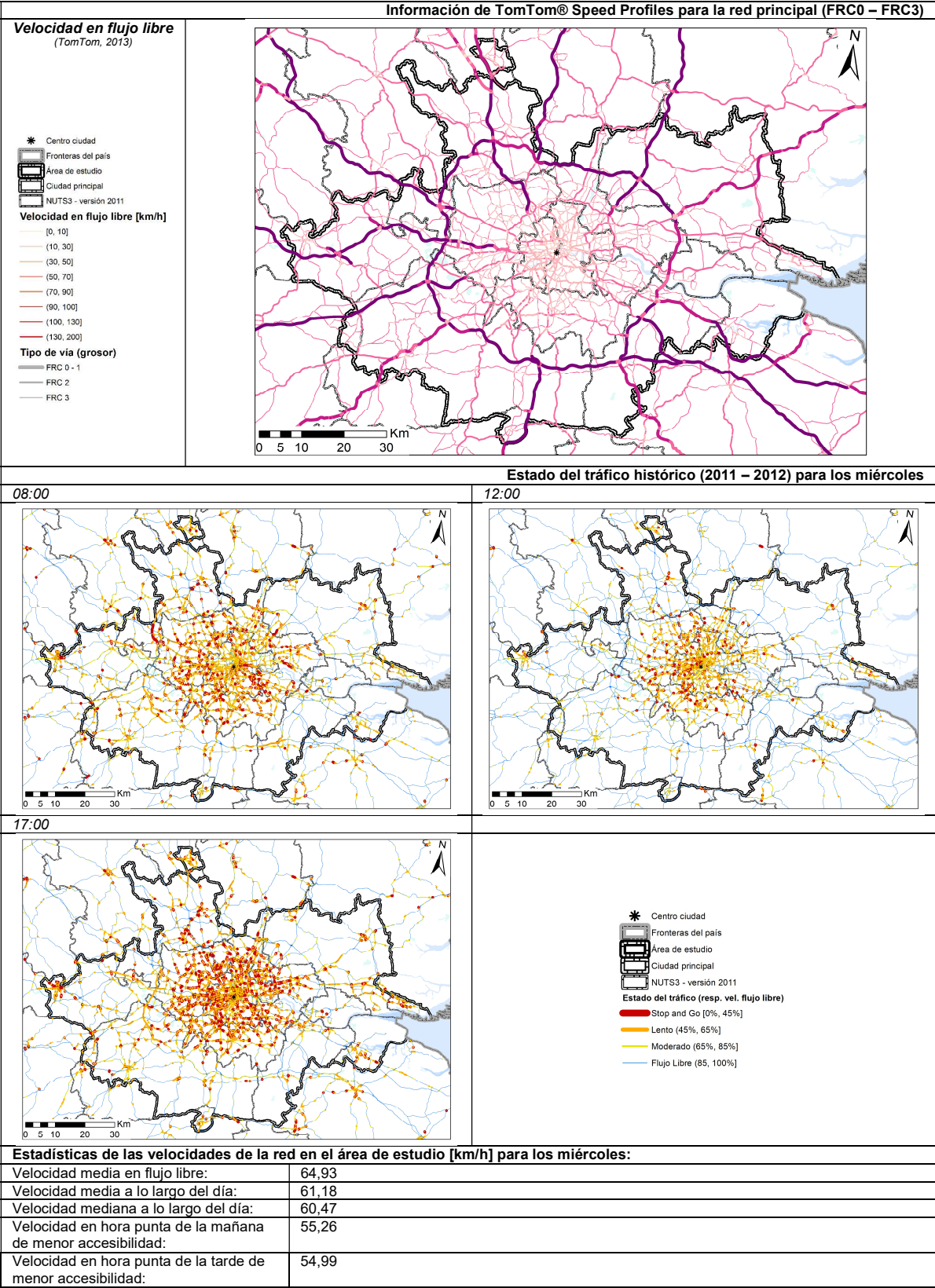
FRC²

Las barras negras del gráfico de la derecha son los km con Speed Profile (SP). Se muestra también el % km con SP por FRC.



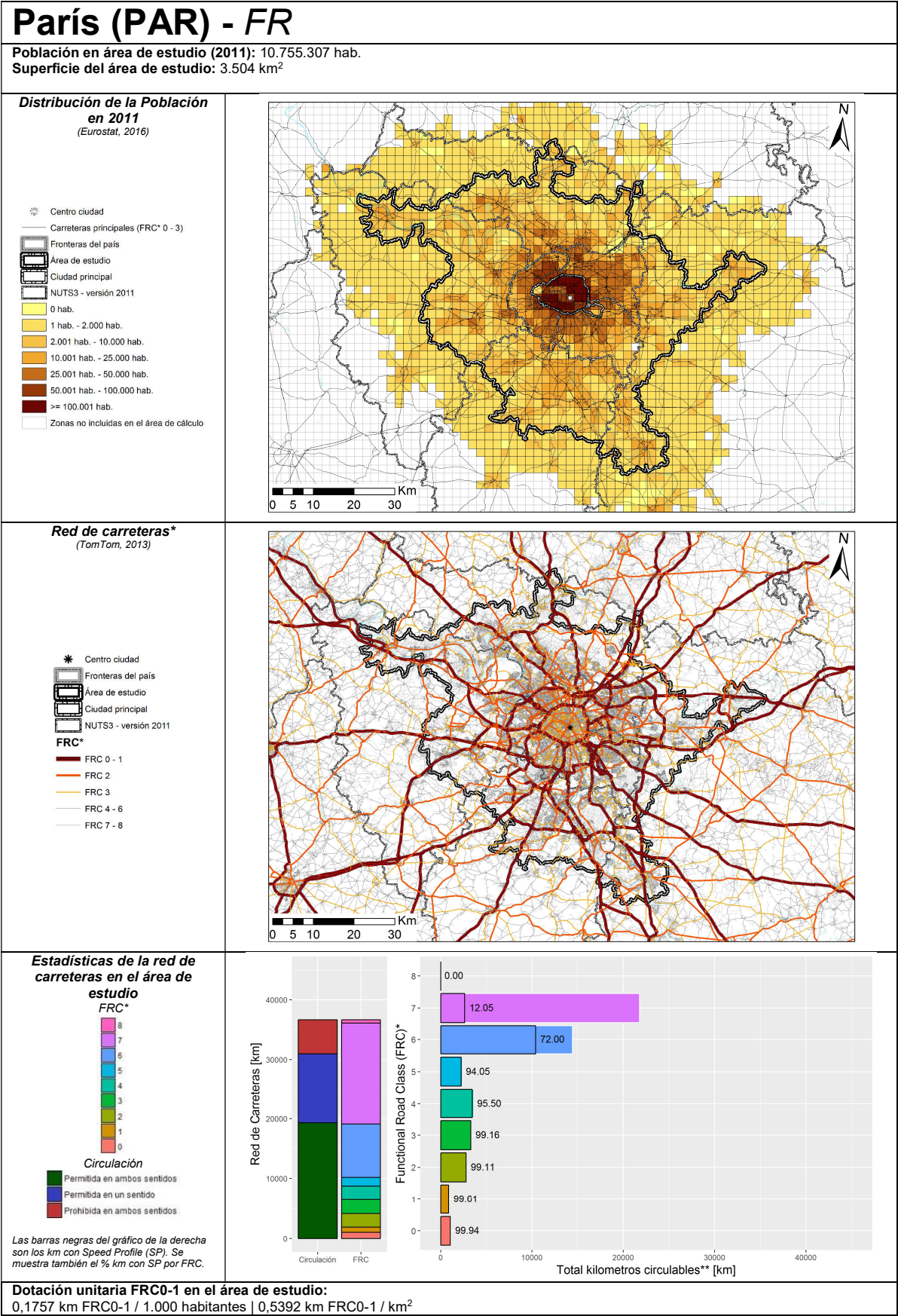
Dotación unitaria FRC0-1 en el área de estudio:

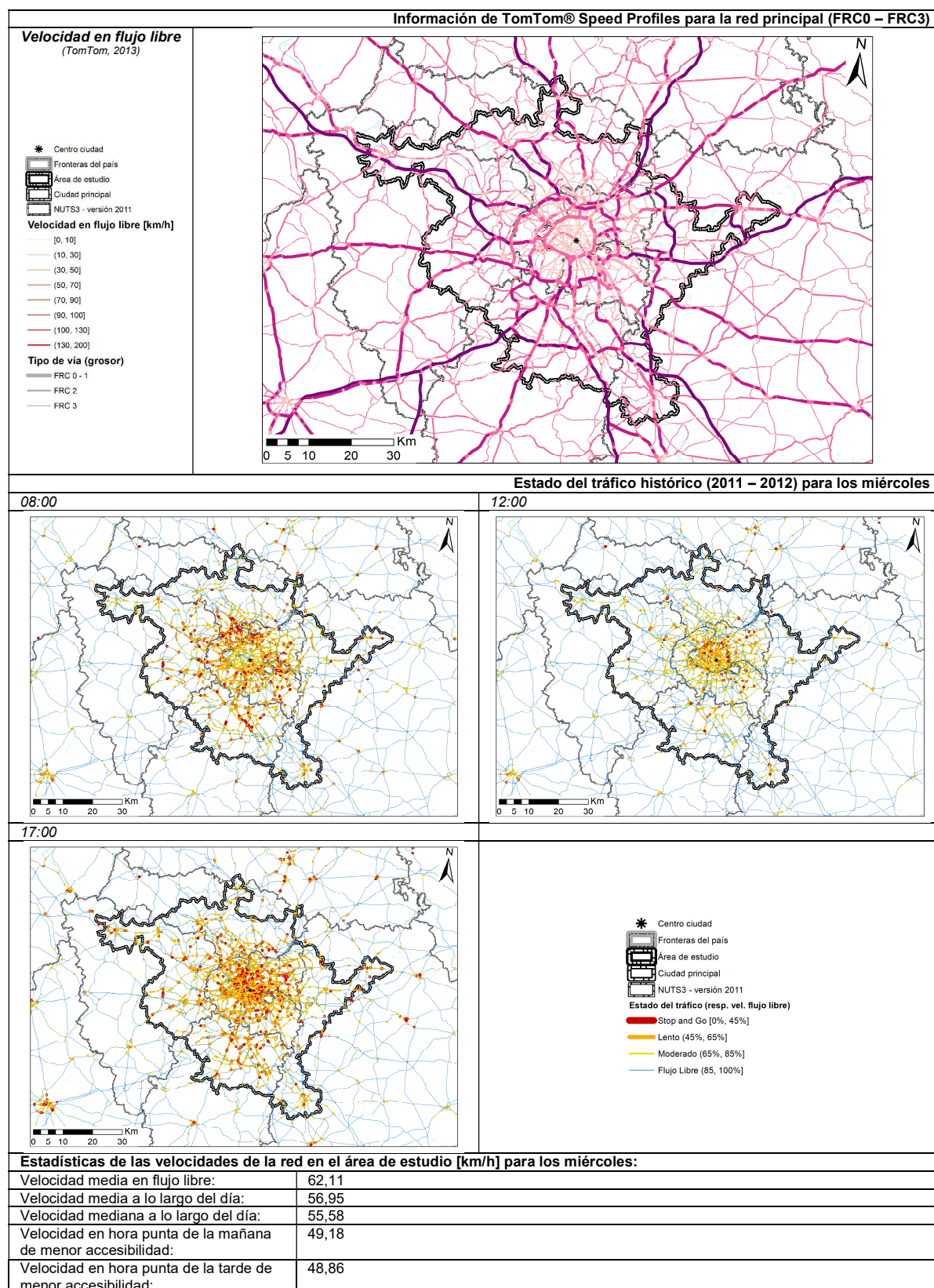
0,0901 km FRC0-1 / 1.000 habitantes | 0,1765km FRC0-1 / km²



* Definiciones de FRC de TomTom®. FRC 0: Autopistas y otras carreteras primarias; FRC 1: Carreteras primarias con características inferiores a autopista; FRC 2: Otras carreteras primarias; FRC 3: Carreteras secundarias; FRC 4: Carreteras conectoras de la red local; FRC 5: Vías locales de alta importancia; FRC 6: Vías locales; FRC 7: Vías locales de menor importancia; FRC 8: Otras carreteras.

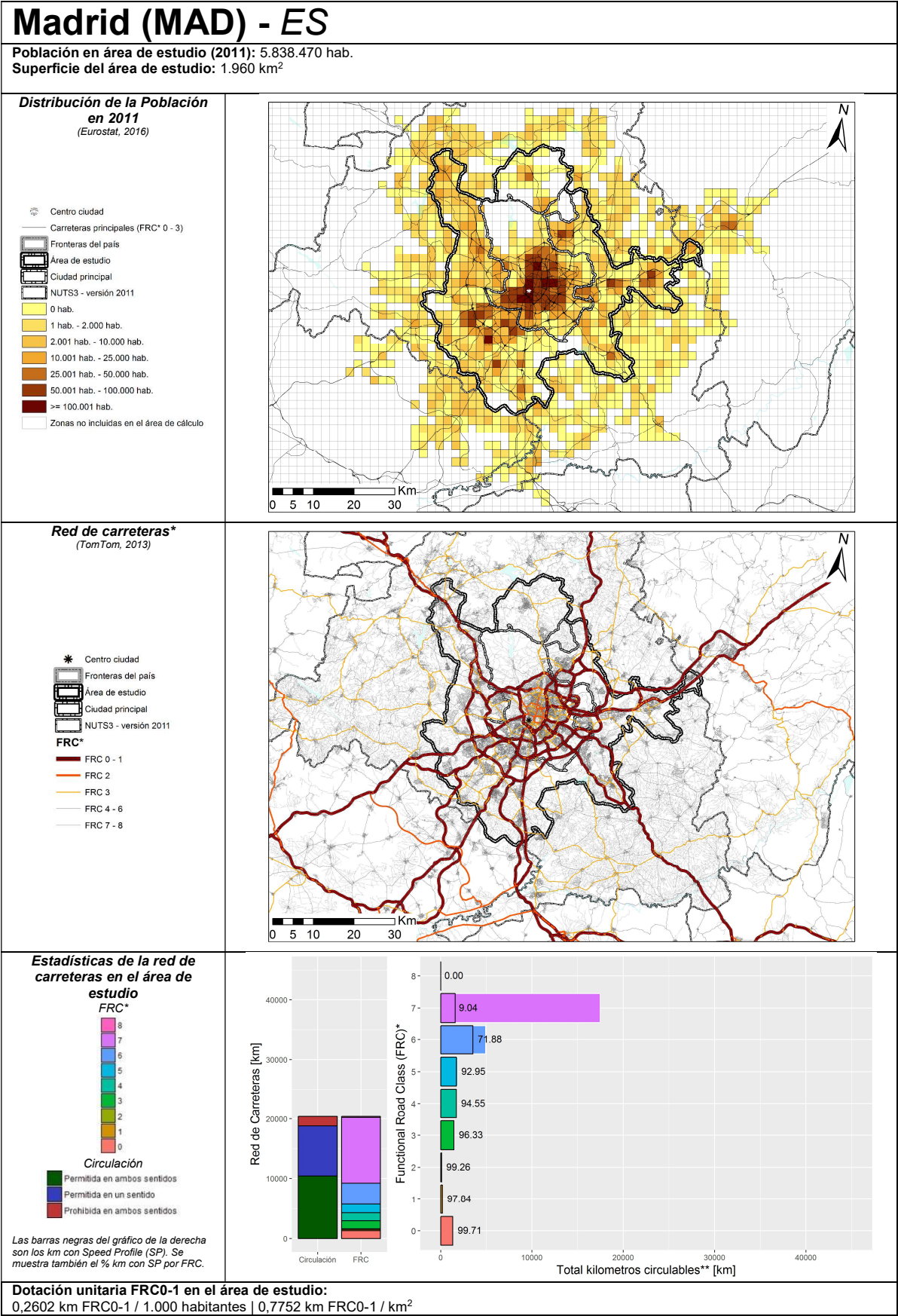
** Km de circulación “permitida en ambos sentidos” se cuentan doble, mientras que “prohibida en ambos sentidos” no se contabiliza

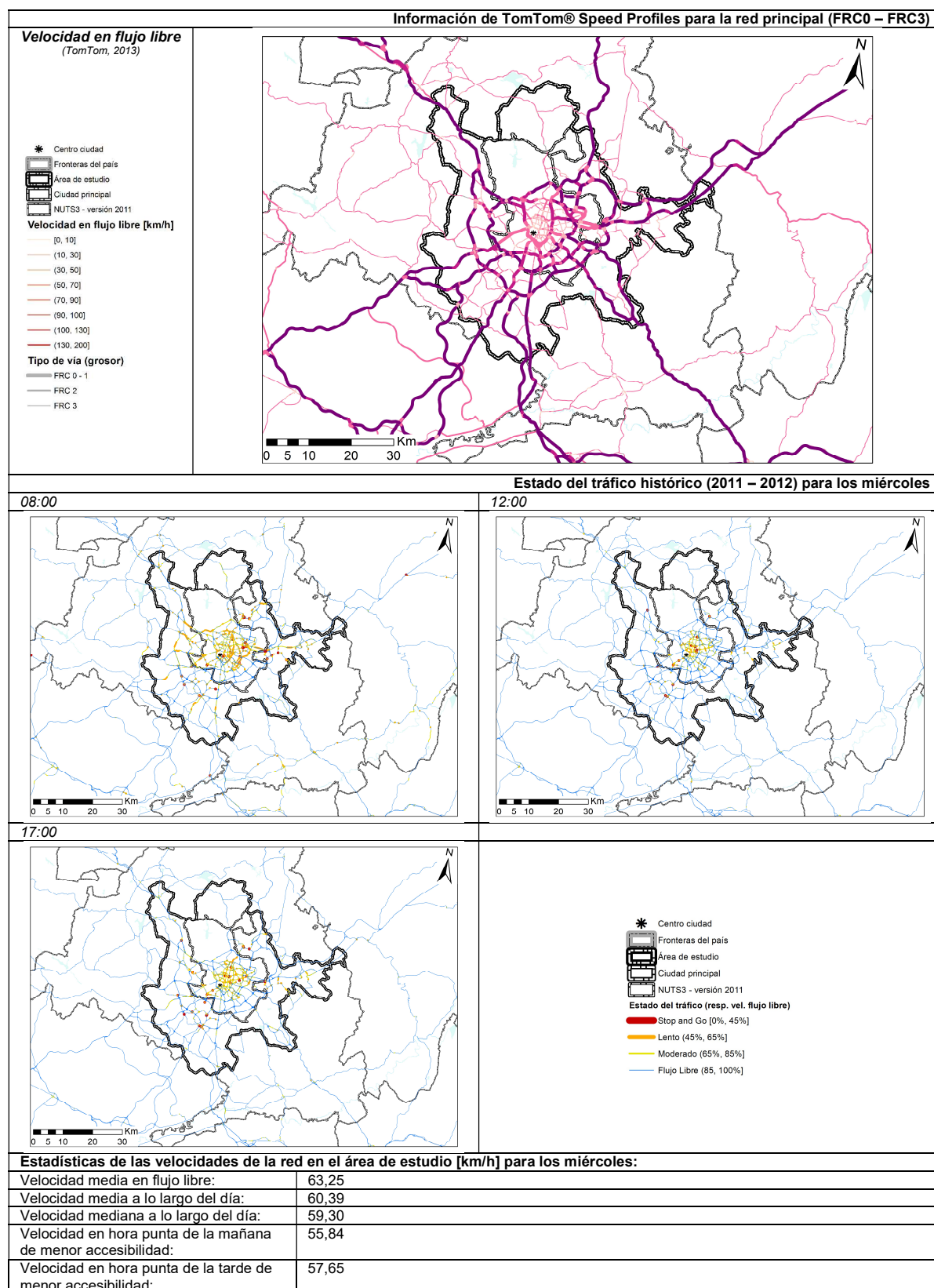




* Definiciones de FRC de TomTom®. FRC 0: Autopistas y otras carreteras primarias; FRC 1: Carreteras primarias con características inferiores a autopista; FRC 2: Otras carreteras primarias; FRC 3: Carreteras secundarias; FRC 4: Carreteras conectoras de la red local; FRC 5: Vías locales de alta importancia; FRC 6: Vías locales; FRC 7: Vías locales de menor importancia; FRC 8: Otras carreteras.

** Km de circulación “permitida en ambos sentidos” se cuentan doble, mientras que “prohibida en ambos sentidos” no se contabiliza



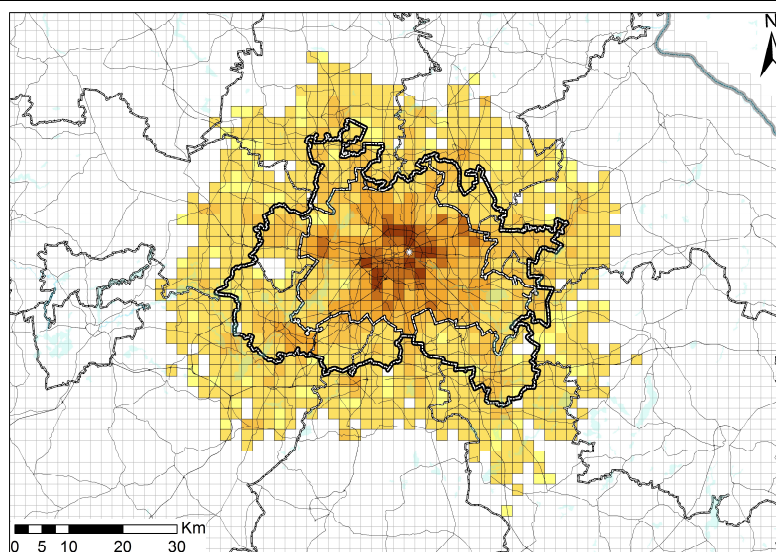


* Definiciones de FRC de TomTom®. FRC 0: Autopistas y otras carreteras primarias; FRC 1: Carreteras primarias con características inferiores a autopista; FRC 2: Otras carreteras primarias; FRC 3: Carreteras secundarias; FRC 4: Carreteras conectoras de la red local; FRC 5: Vías locales de alta importancia; FRC 6: Vías locales; FRC 7: Vías locales de menor importancia; FRC 8: Otras carreteras.

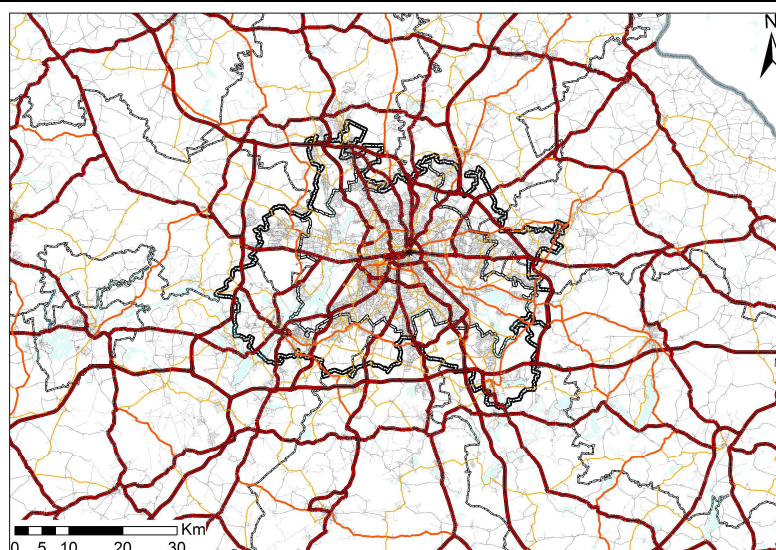
** Km de circulación "permitida en ambos sentidos" se cuentan doble, mientras que "prohibida en ambos sentidos" no se contabiliza

Población en área de estudio (2011): 3.831.475 hab.
Superficie del área de estudio: 1.840 km²

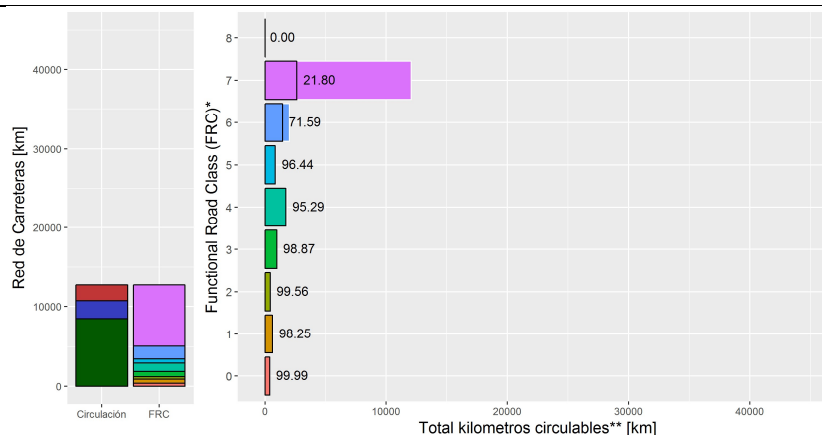
Centro ciudad
 Carreteras principales (FRC* 0 - 3)
 Fronteras del país
 Área de estudio
 Ciudad principal
 NUTS3 - versión 2011
 0 hab.
 1 hab. - 2.000 hab.
 2.001 hab. - 10.000 hab.
 10.001 hab. - 25.000 hab.
 25.001 hab. - 50.000 hab.
 50.001 hab. - 100.000 hab.
 >= 100.001 hab.
 Zonas no incluidas en el área de cálculo



* Centro ciudad
 Fronteras del país
 Área de estudio
 Ciudad principal
 NUTS3 - versión 2011
FRC*
 FRC 0 - 1
 FRC 2
 FRC 3
 FRC 4 - 6
 FRC 7 - 8

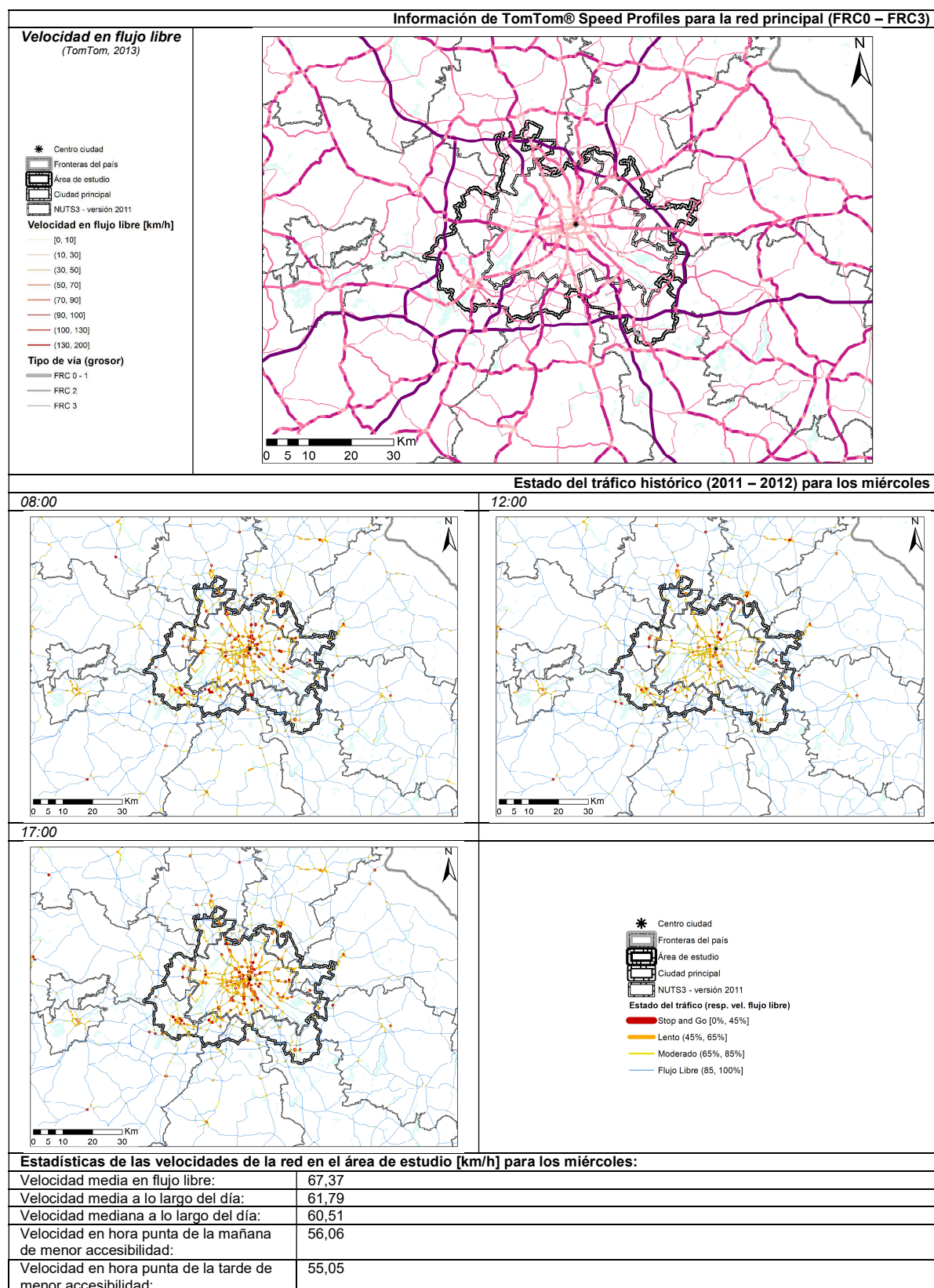
FRC²

Las barras negras del gráfico de la derecha son los km con Speed Profile (SP). Se muestra también el % km con SP por FRC.



Dotación unitaria FRC0-1 en el área de estudio:

0,2353 km FRC0-1 / 1.000 habitantes | 0,4900 km FRC0-1 / km²



* Definiciones de FRC de TomTom®. FRC 0: Autopistas y otras carreteras primarias; FRC 1: Carreteras primarias con características inferiores a autopista; FRC 2: Otras carreteras primarias; FRC 3: Carreteras secundarias; FRC 4: Carreteras conectoras de la red local; FRC 5: Vías locales de alta importancia; FRC 6: Vías locales; FRC 7: Vías locales de menor importancia; FRC 8: Otras carreteras.

** Km de circulación "permitida en ambos sentidos" se cuentan doble, mientras que "prohibida en ambos sentidos" no se contabiliza

Población en área de estudio (2011): 4.402.333 hab.
Superficie del área de estudio: 1.420 km²

Población en área de estudio (2011): 4.402.333 hab.
Superficie del área de estudio: 1.420 km²

Centro ciudad

Carreteras principales (FRC* 0 - 3)

Fronteras del país

Área de estudio

Ciudad principal

NUTS3 - versión 2011

0 hab.

1 hab. - 2.000 hab.

2.001 hab. - 10.000 hab.

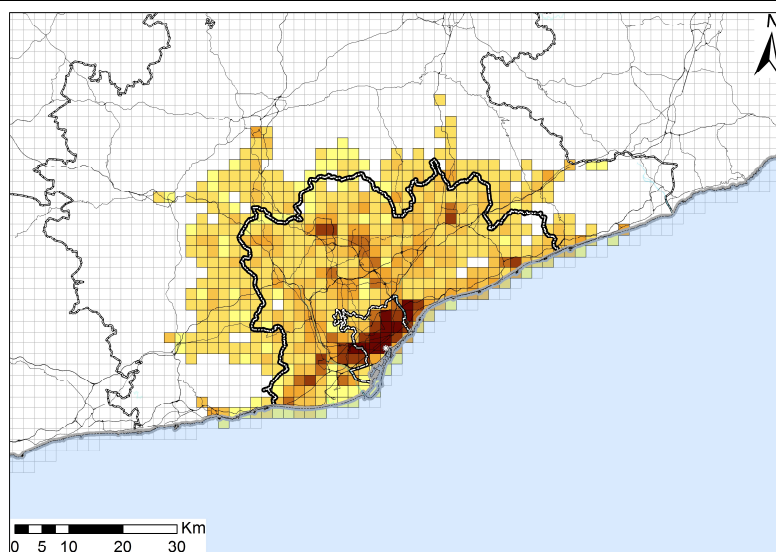
10.001 hab. - 25.000 hab.

25.001 hab. - 50.000 hab.

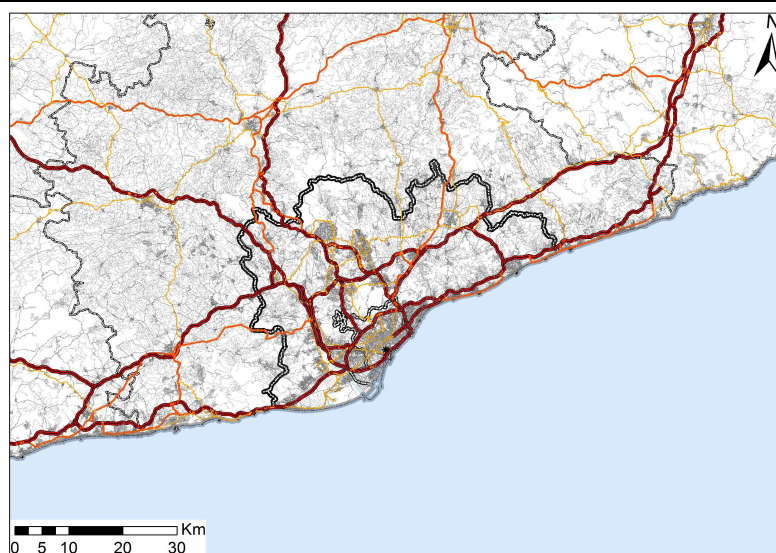
50.001 hab. - 100.000 hab.

≥ 100.001 hab.

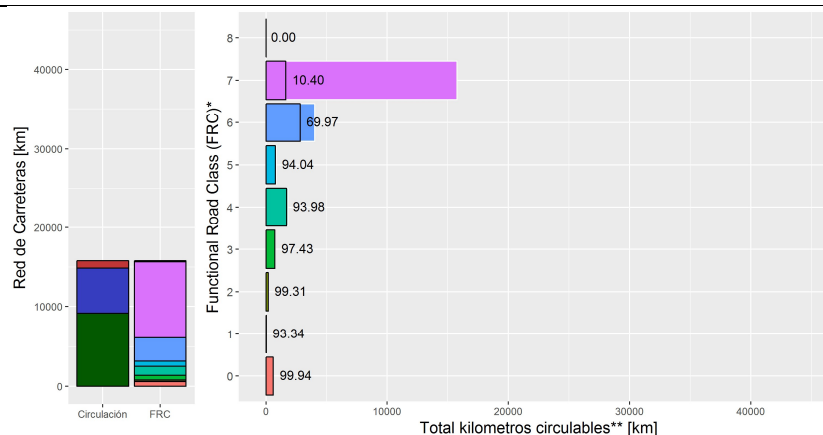
Zonas no incluidas en el área de cálculo



* Centro ciudad
 Fronteras del país
 Área de estudio
 Ciudad principal
 NUTS3 - versión 2011
FRC*
 FRC 0 - 1
 FRC 2
 FRC 3
 FRC 4 - 6
 FRC 7 - 8

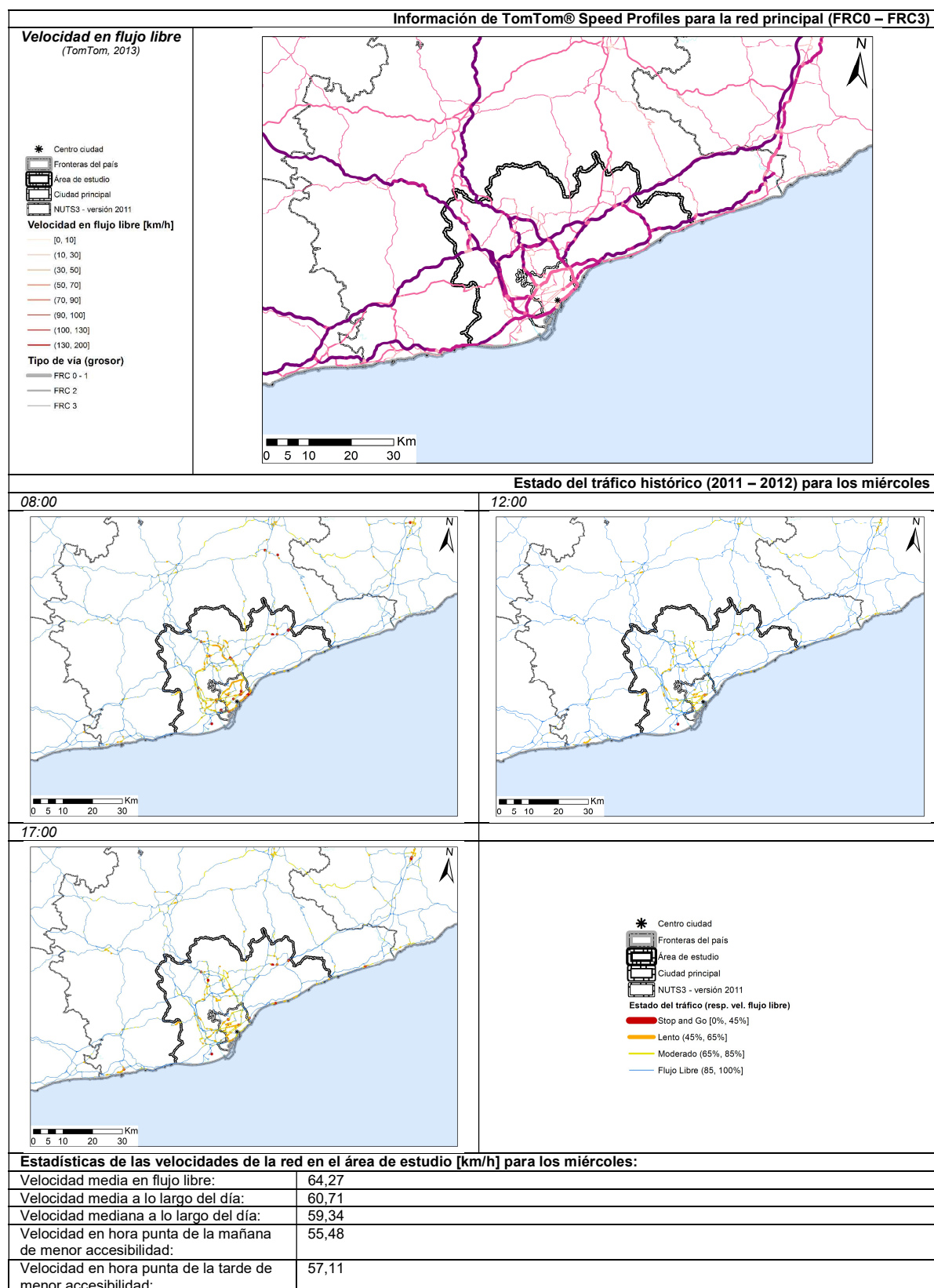
FRC²

Las barras negras del gráfico de la derecha son los km con Speed Profile (SP). Se muestra también el % km con SP por FRC.



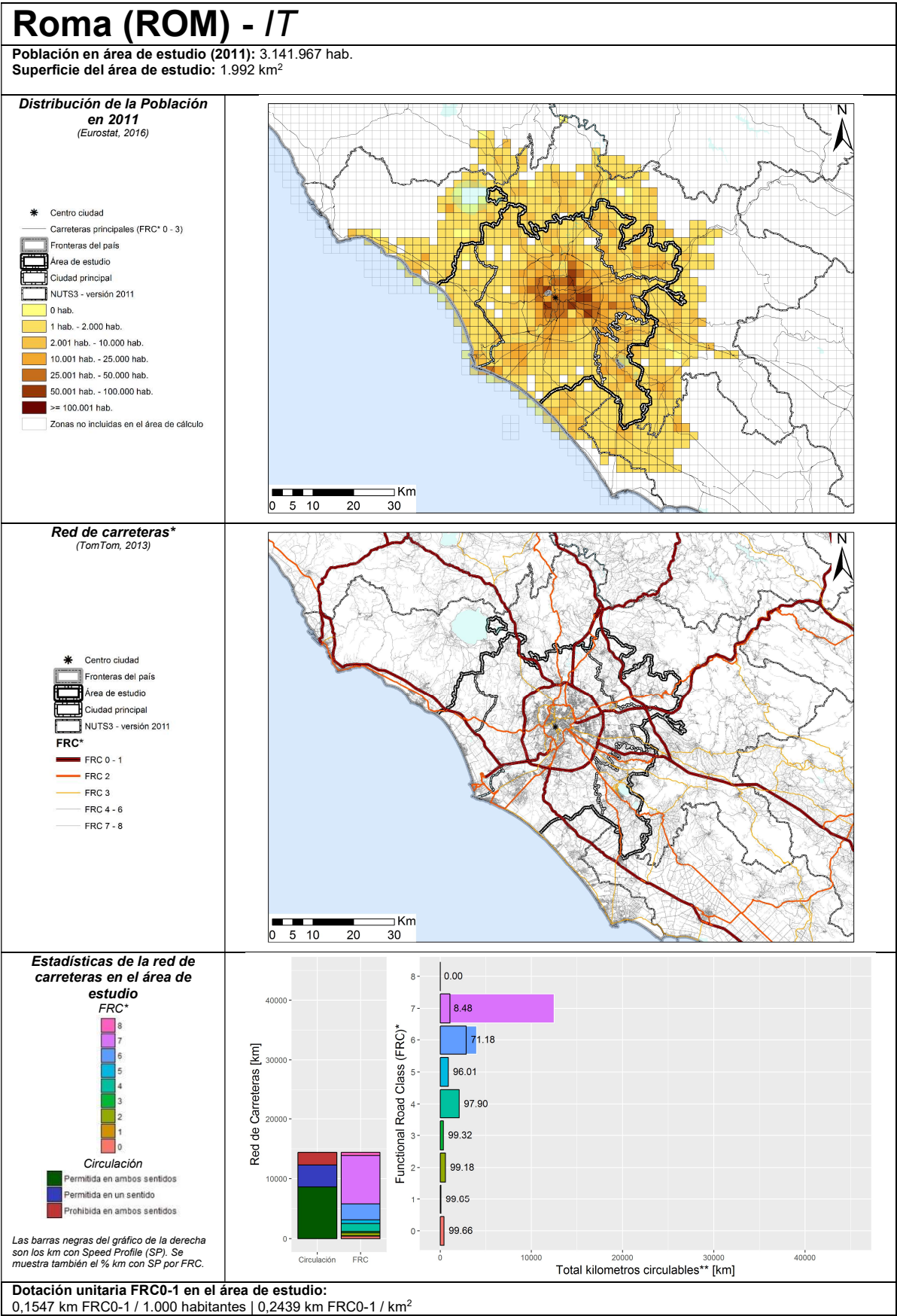
Dotación unitaria FRC0-1 en el área de estudio:

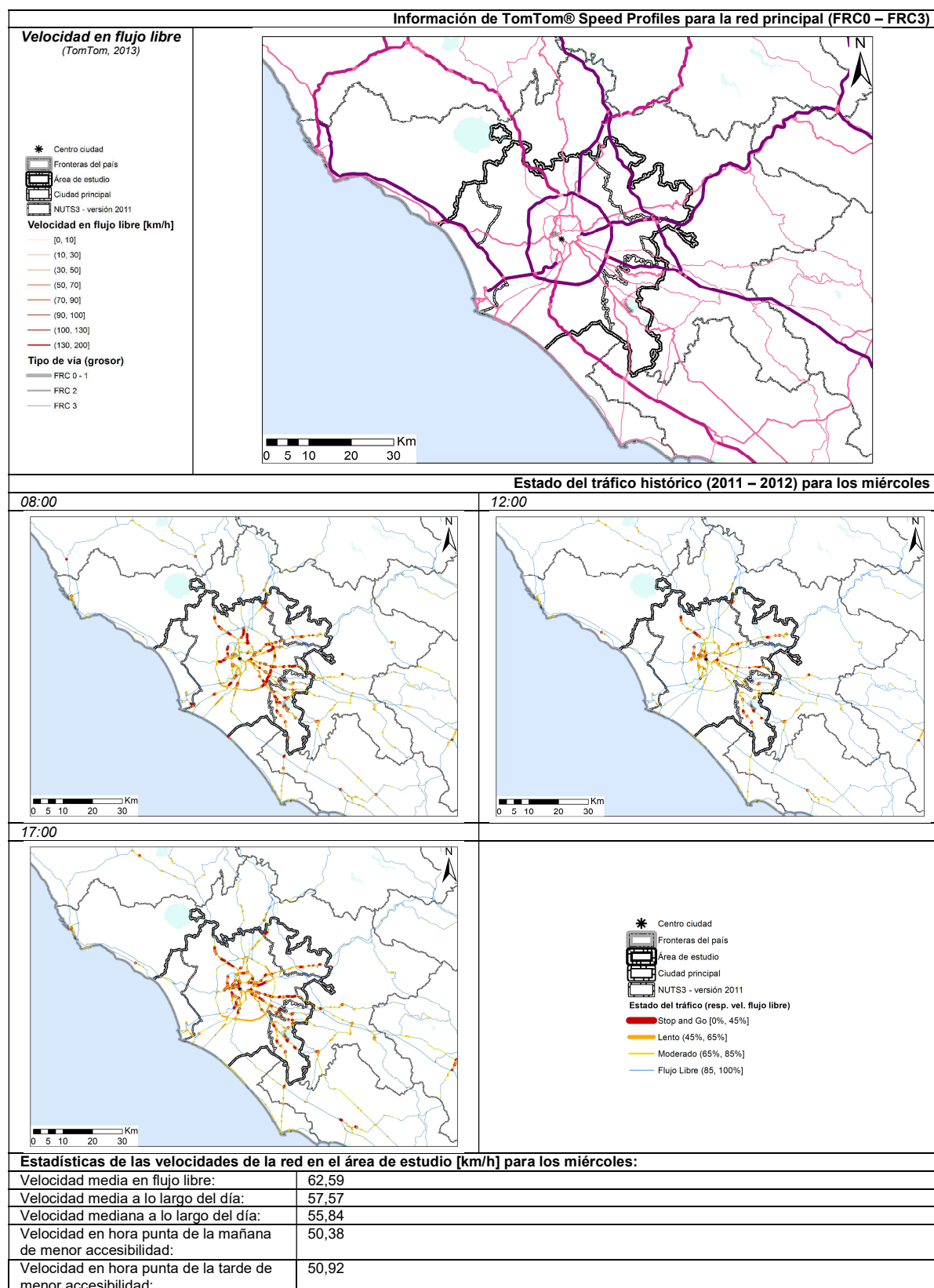
Dotación unitaria FRC0-1 en el área de estudio:
0,1436 km FRC0-1 / 1.000 habitantes | 0,4451 km FRC0-1 / km²



* Definiciones de FRC de TomTom®. FRC 0: Autopistas y otras carreteras primarias; FRC 1: Carreteras primarias con características inferiores a autopista; FRC 2: Otras carreteras primarias; FRC 3: Carreteras secundarias; FRC 4: Carreteras conectoras de la red local; FRC 5: Vías locales de alta importancia; FRC 6: Vías locales; FRC 7: Vías locales de menor importancia; FRC 8: Otras carreteras.

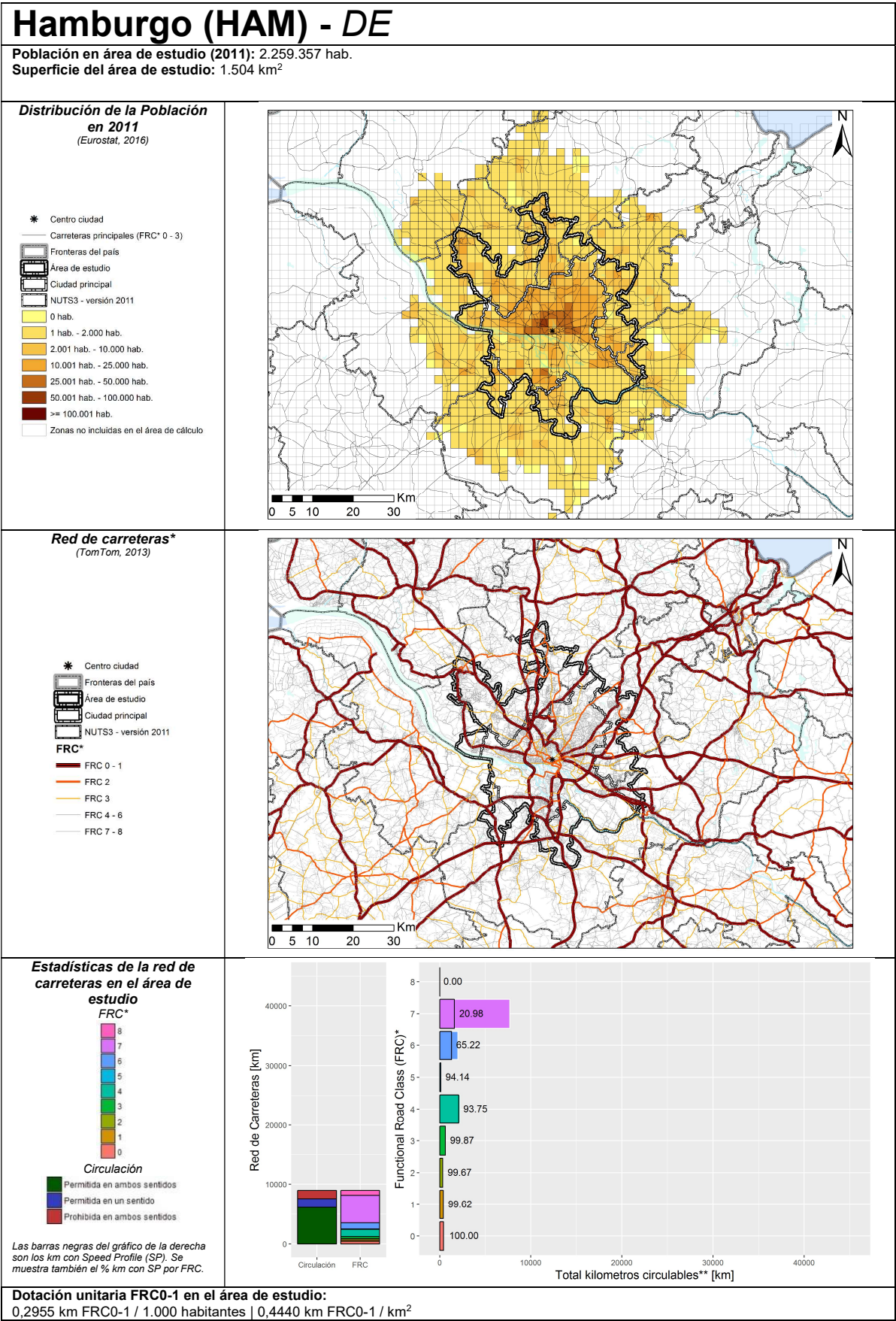
** Km de circulación “permitida en ambos sentidos” se cuentan doble, mientras que “prohibida en ambos sentidos” no se contabiliza



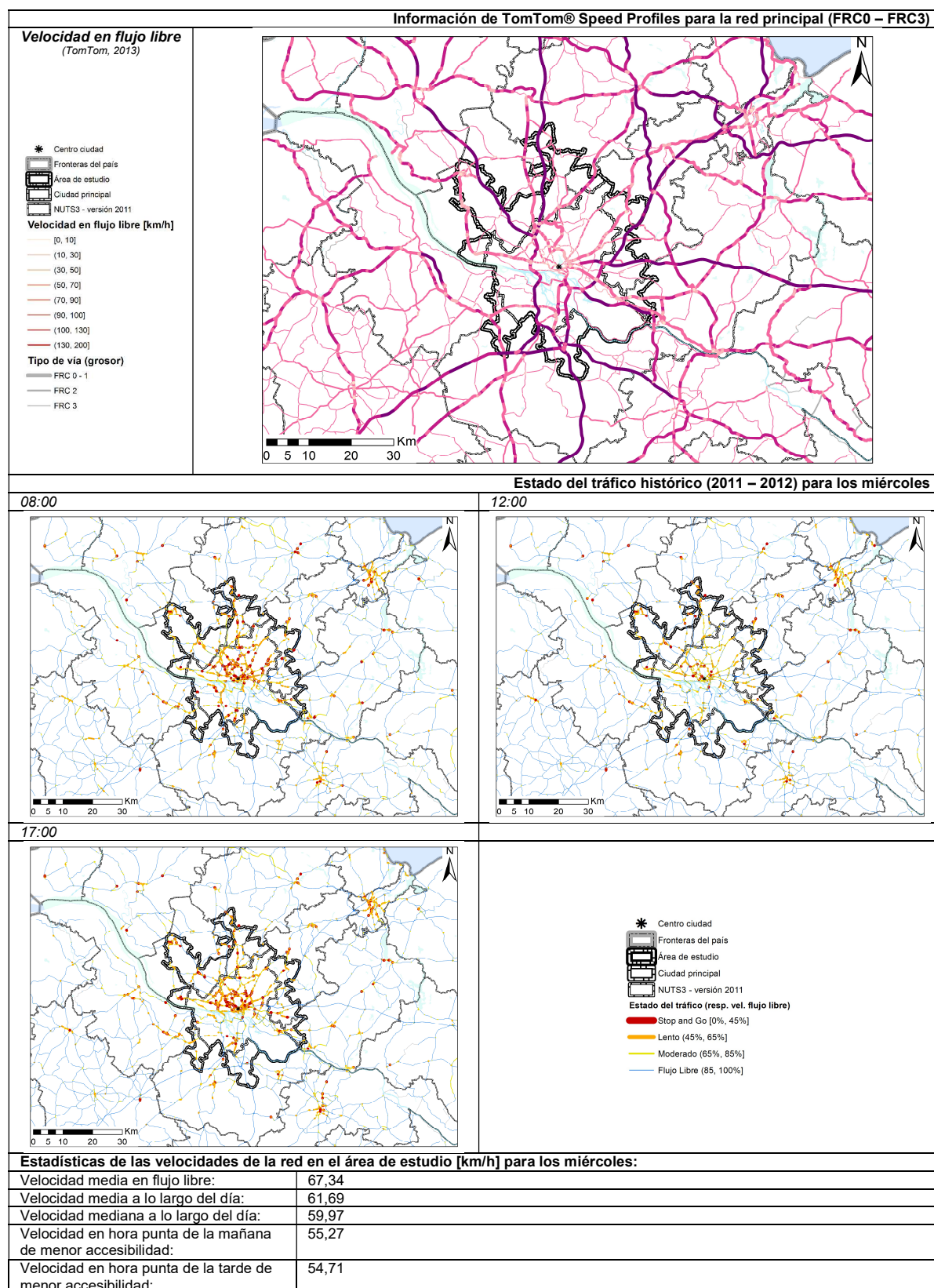


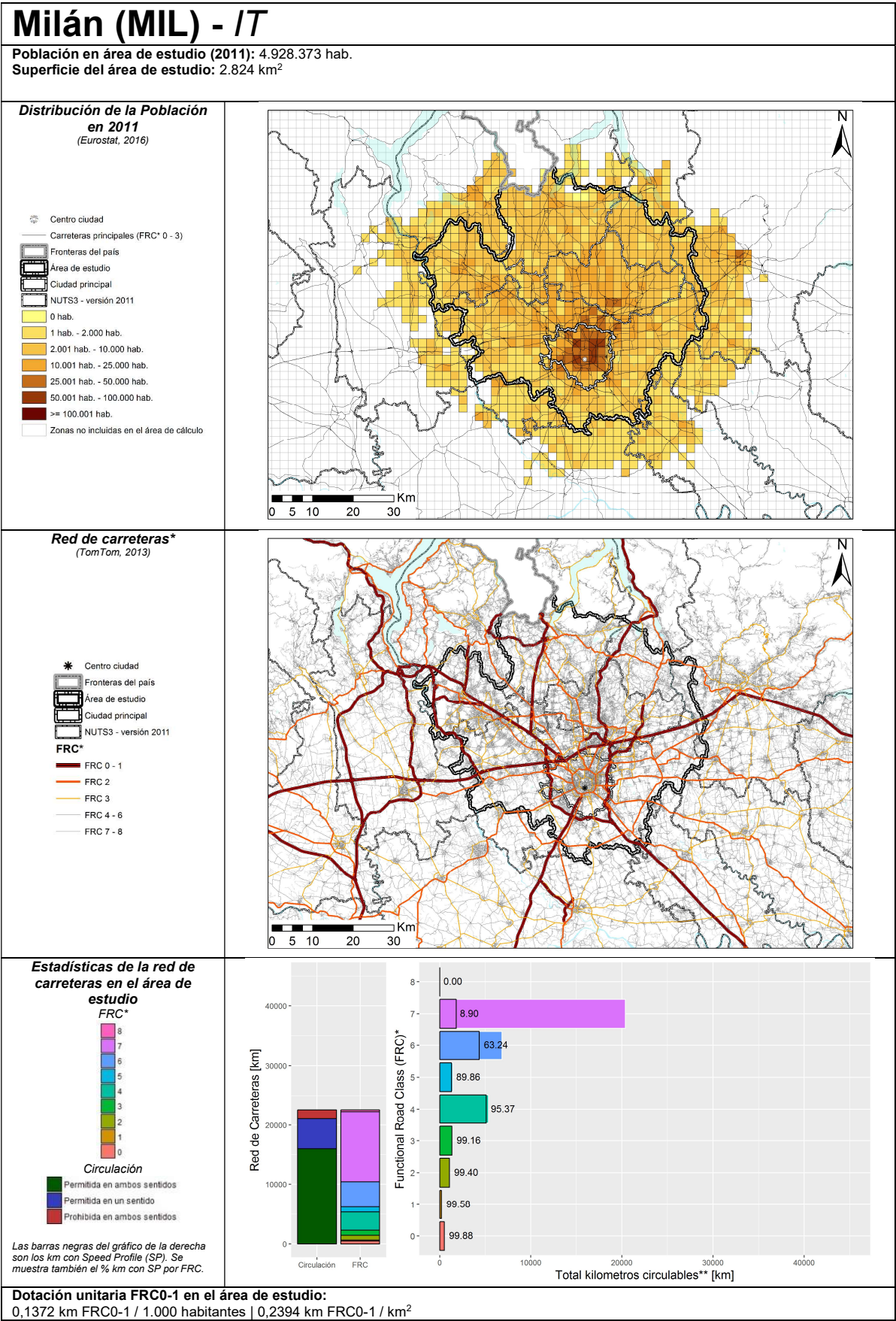
* Definiciones de FRC de TomTom®. FRC 0: Autopistas y otras carreteras primarias; FRC 1: Carreteras primarias con características inferiores a autopista; FRC 2: Otras carreteras primarias; FRC 3: Carreteras secundarias; FRC 4: Carreteras conectoras de la red local; FRC 5: Vías locales de alta importancia; FRC 6: Vías locales; FRC 7: Vías locales de menor importancia; FRC 8: Otras carreteras.

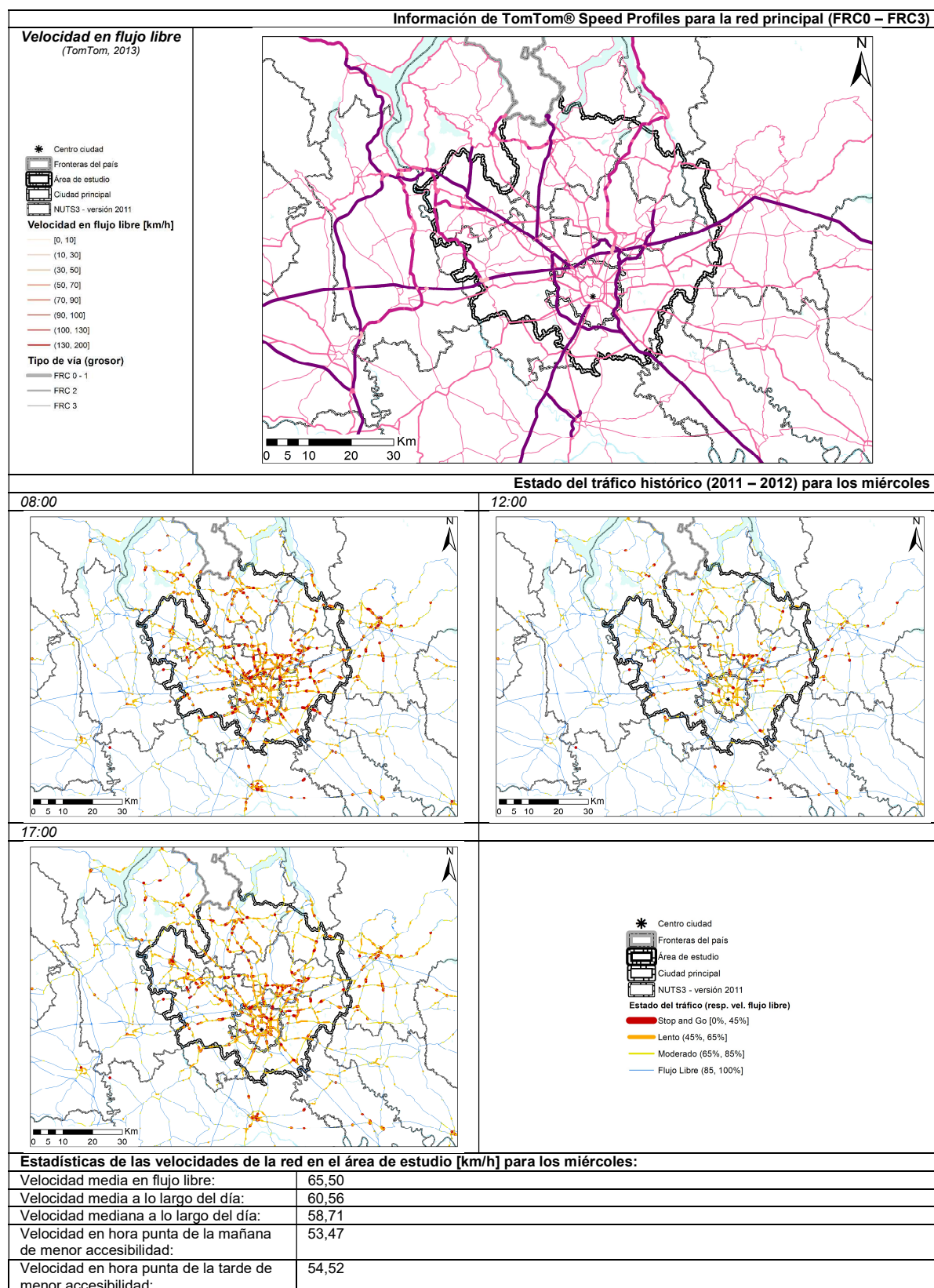
** Km de circulación "permitida en ambos sentidos" se cuentan doble, mientras que "prohibida en ambos sentidos" no se contabiliza



Dotación unitaria FRC0-1 en el área de estudio:
0,2955 km FRC0-1 / 1.000 habitantes | 0,4440 km FRC0-1 / km²

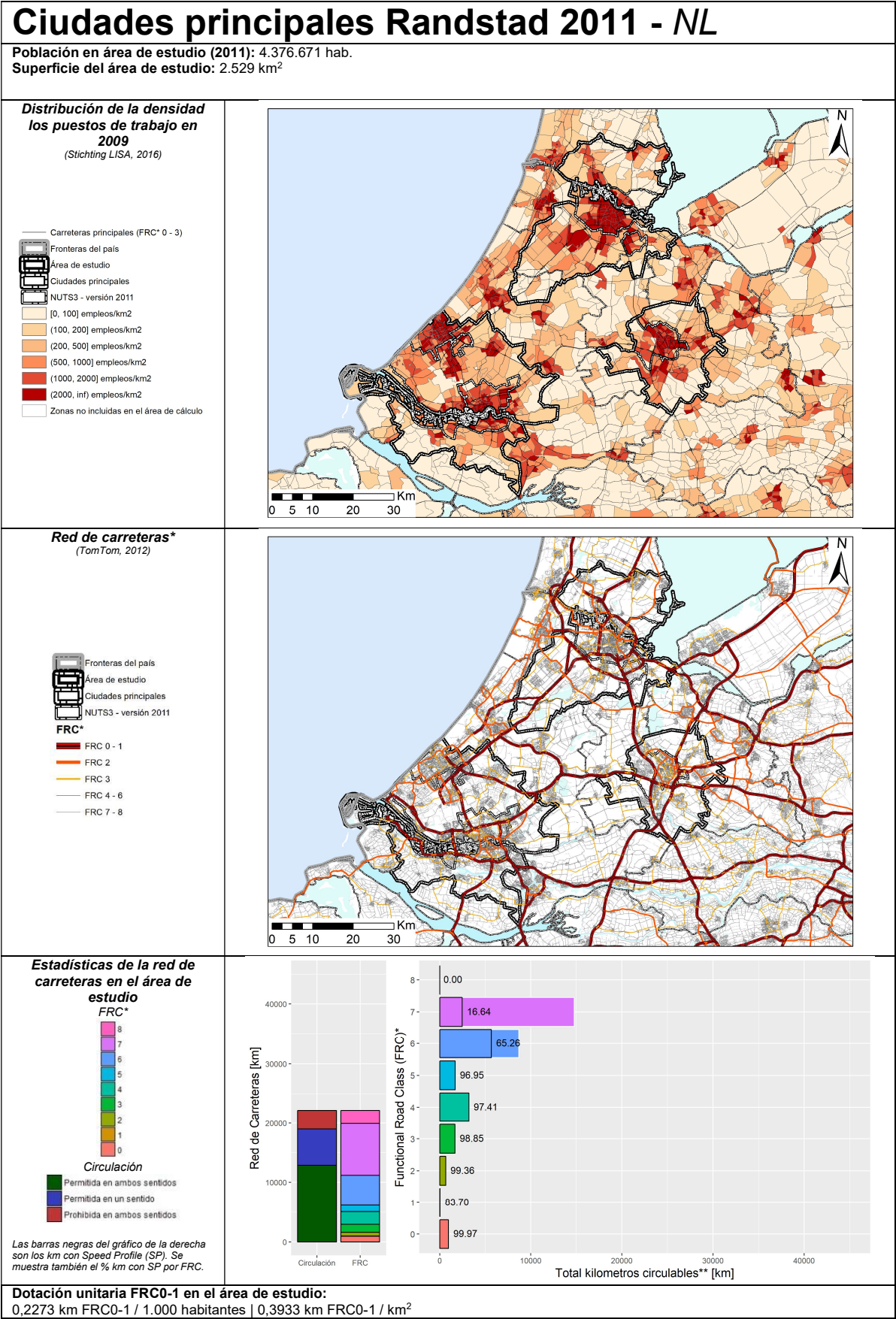


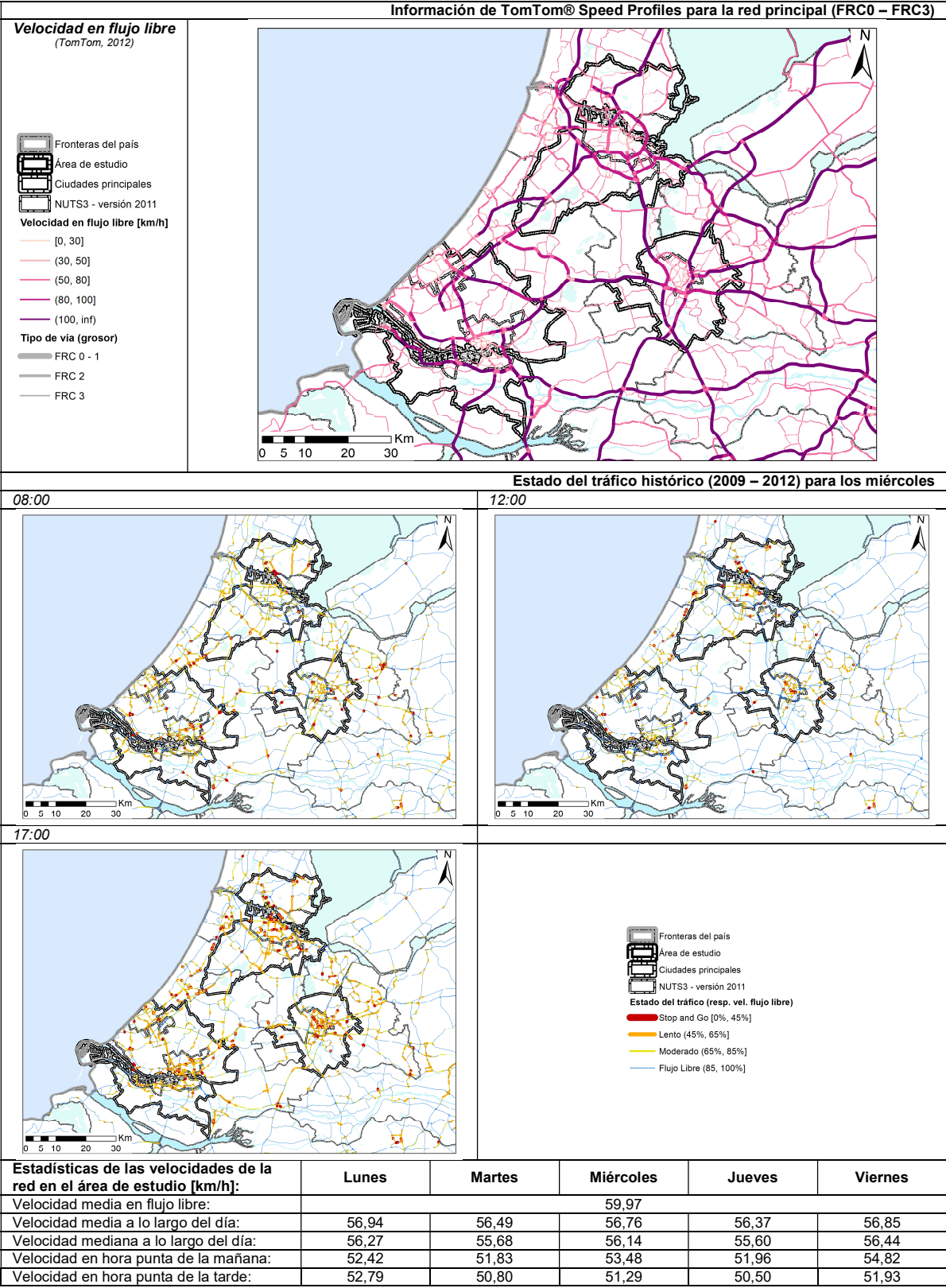




* Definiciones de FRC de TomTom®. FRC 0: Autopistas y otras carreteras primarias; FRC 1: Carreteras primarias con características inferiores a autopista; FRC 2: Otras carreteras primarias; FRC 3: Carreteras secundarias; FRC 4: Carreteras conectoras de la red local; FRC 5: Vías locales de alta importancia; FRC 6: Vías locales; FRC 7: Vías locales de menor importancia; FRC 8: Otras carreteras.

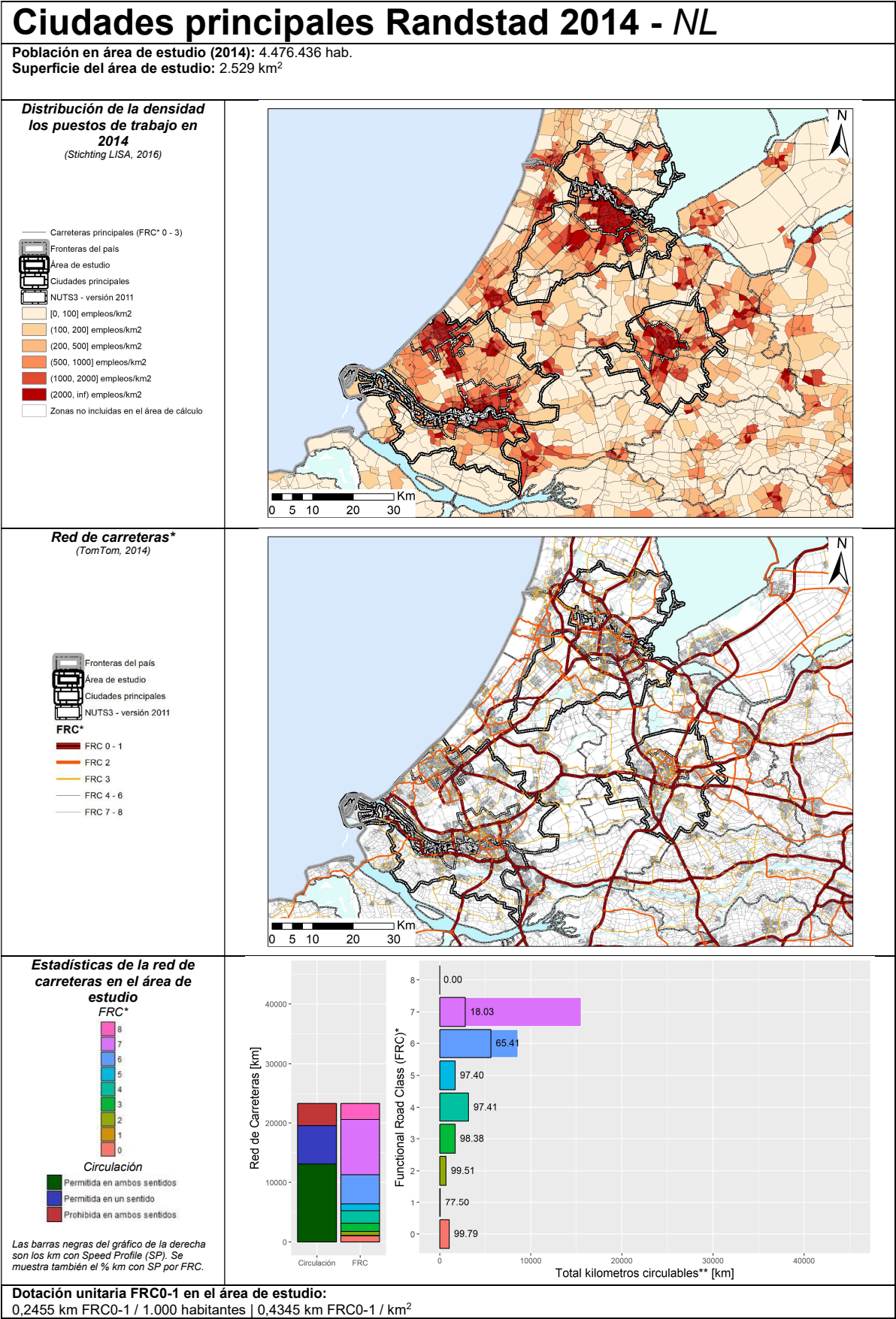
** Km de circulación "permitida en ambos sentidos" se cuentan doble, mientras que "prohibida en ambos sentidos" no se contabiliza

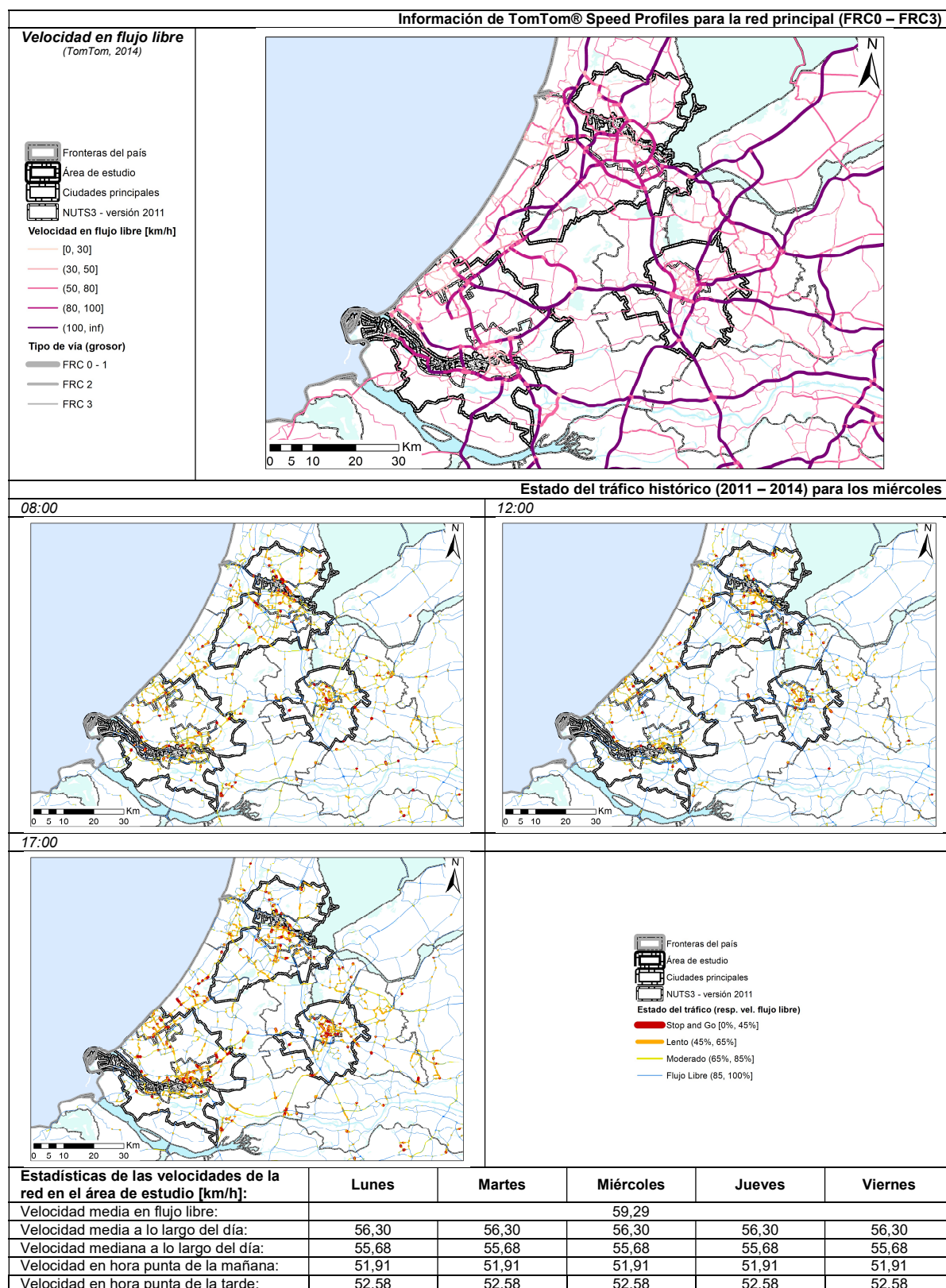




* Definiciones de FRC de TomTom®. FRC 0: Autopistas y otras carreteras primarias; FRC 1: Carreteras primarias con características inferiores a autopista; FRC 2: Otras carreteras primarias; FRC 3: Carreteras secundarias; FRC 4: Carreteras conectoras de la red local; FRC 5: Vías locales de alta importancia; FRC 6: Vías locales; FRC 7: Vías locales de menor importancia; FRC 8: Otras carreteras.

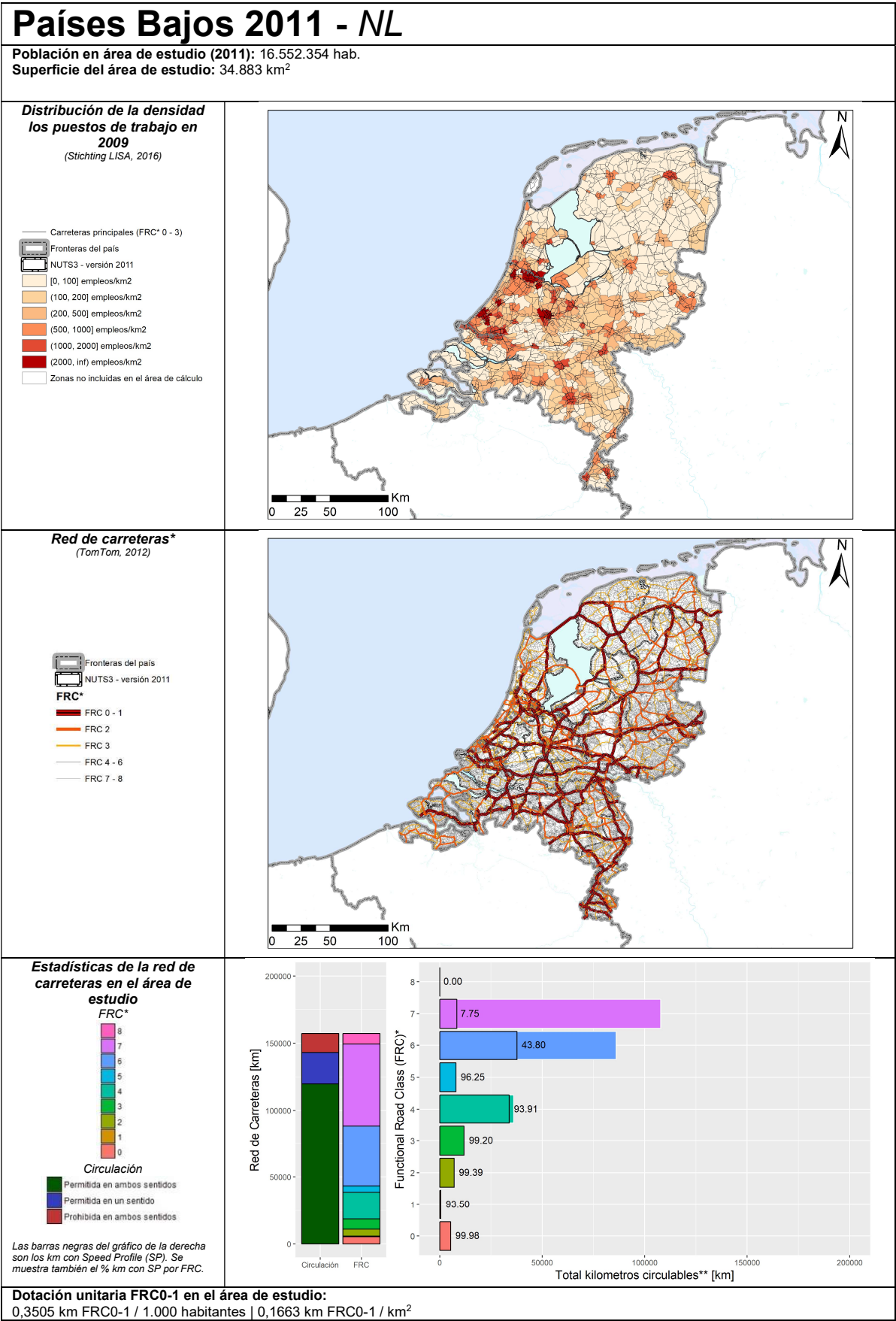
** Km de circulación “permitida en ambos sentidos” se cuentan doble, mientras que “prohibida en ambos sentidos” no se contabiliza

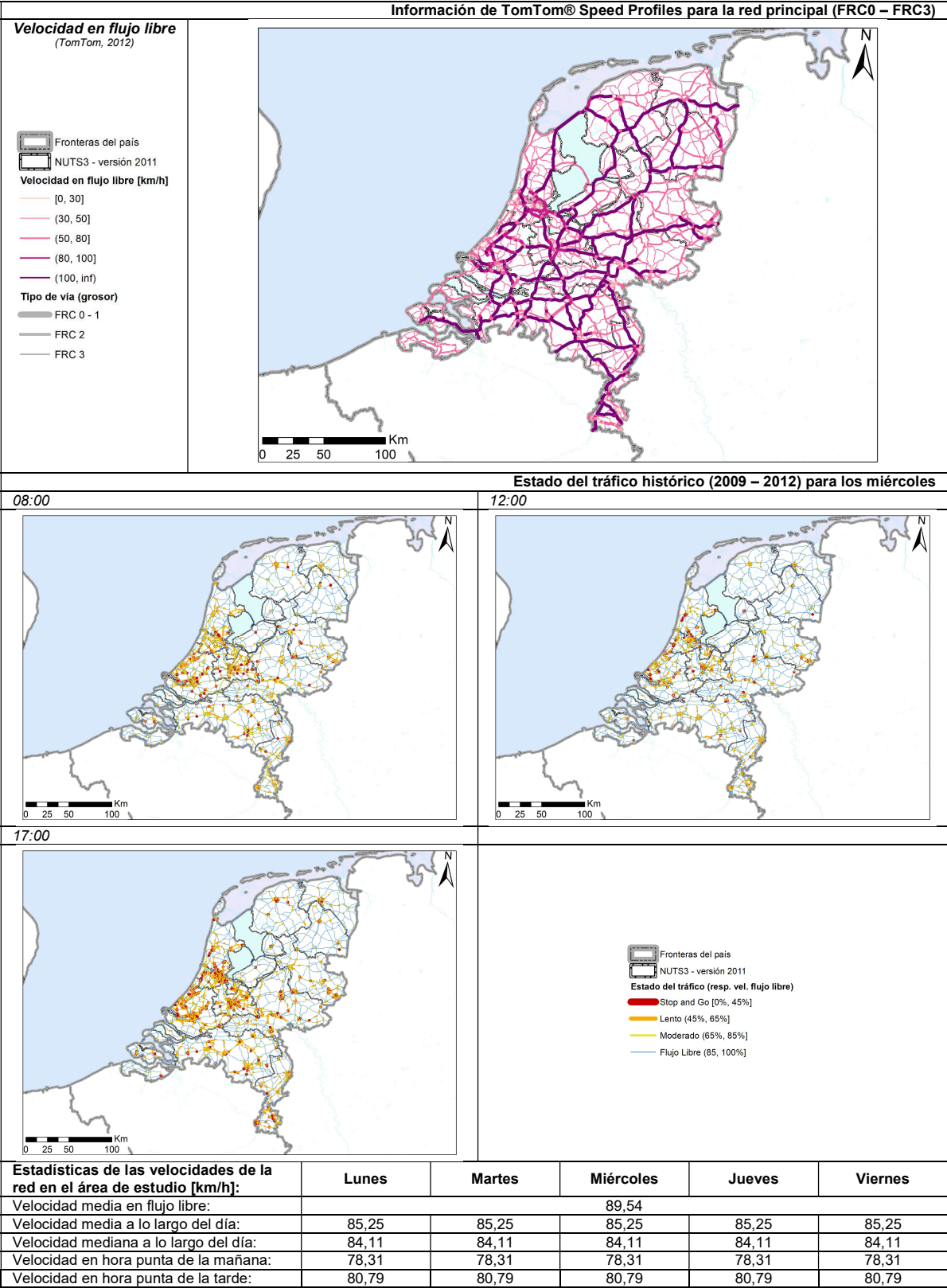


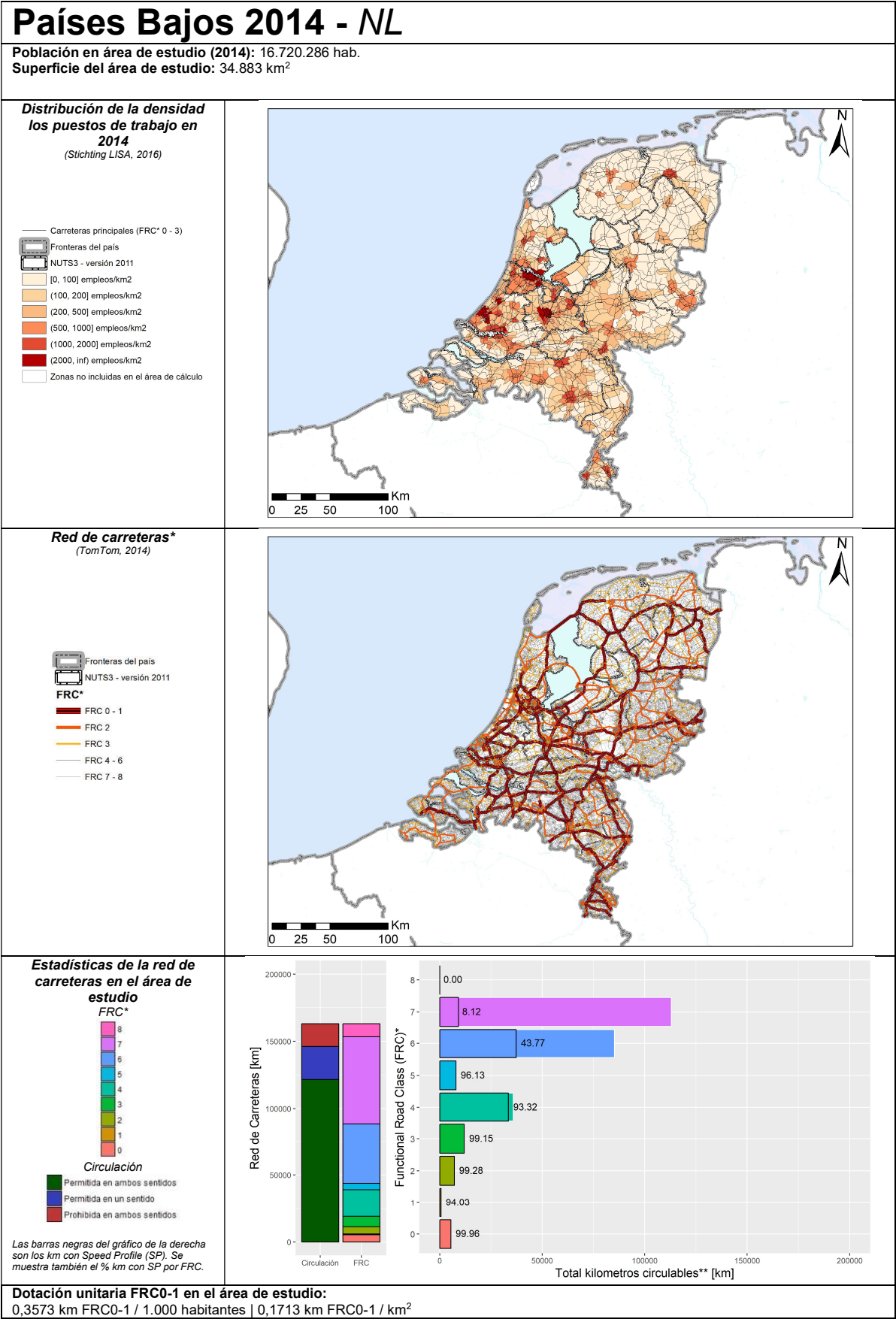


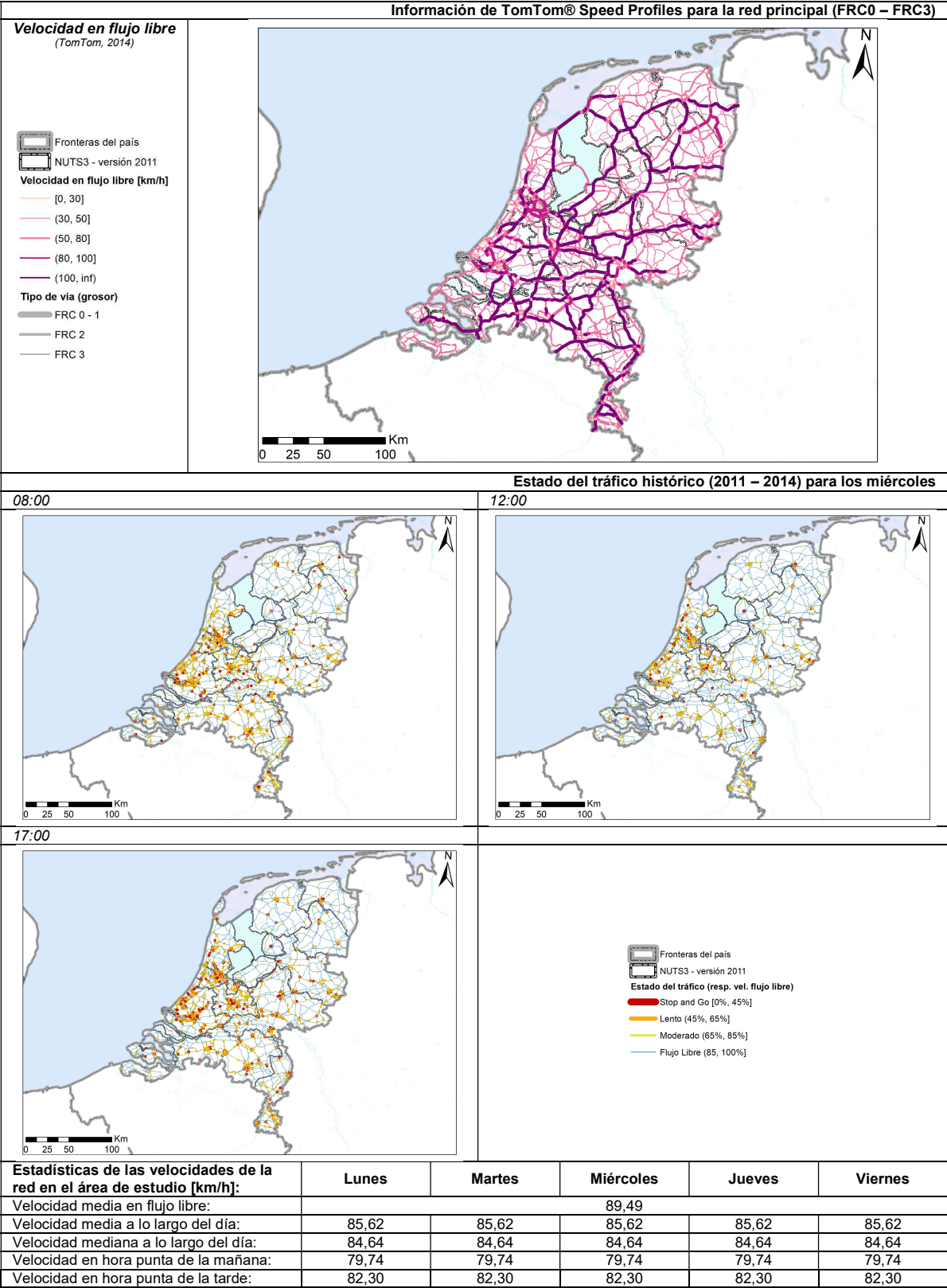
* Definiciones de FRC de TomTom®. FRC 0: Autopistas y otras carreteras primarias; FRC 1: Carreteras primarias con características inferiores a autopista; FRC 2: Otras carreteras primarias; FRC 3: Carreteras secundarias; FRC 4: Carreteras conectoras de la red local; FRC 5: Vías locales de alta importancia; FRC 6: Vías locales; FRC 7: Vías locales de menor importancia; FRC 8: Otras carreteras.

** Km de circulación "permitida en ambos sentidos" se cuentan doble, mientras que "prohibida en ambos sentidos" no se contabiliza









* Definiciones de FRC de TomTom®. FRC 0: Autopistas y otras carreteras primarias; FRC 1: Carreteras primarias con características inferiores a autopista; FRC 2: Otras carreteras primarias; FRC 3: Carreteras secundarias; FRC 4: Carreteras conectoras de la red local; FRC 5: Vías locales de alta importancia; FRC 6: Vías locales; FRC 7: Vías locales de menor importancia; FRC 8: Otras carreteras.

** Km de circulación “permitida en ambos sentidos” se cuentan doble, mientras que “prohibida en ambos sentidos” no se contabiliza

Anexo B. Módulos

B.1. Módulos para el cálculo y valoración de resultados

Para la obtención de los resultados de la tesis, ha sido necesario realizar diversos módulos que automaticen procesos y reduzcan los costes de cálculo mediante el uso y combinación de diferentes herramientas comerciales, y scripts programados expresamente para este trabajo. También se ha requerido el diseño de una estructura de datos que permitiese introducir directamente los resultados obtenidos de cada módulo a los módulos posteriores en la medida de lo posible y que pudiese ser fácilmente fraccionable y agregable.

Este concepto modular del proceso ha permitido el empleo de más de un ordenador al mismo tiempo, técnica que se conoce como paralelizar y que es uno de los pilares de la revolución de los análisis Big Data. La paralelización de procesos no solo ha permitido dedicar más tiempo al análisis de los resultados sino también que en caso de detectar algún tipo de error, este se puede subsanar con menor coste puesto a que sólo se deben recalcular los resultados erróneos.

Cabe decir que, pese a que cada módulo puede funcionar en ordenadores diferentes, las herramientas y funciones de cada uno de ellos no, de manera que cada módulo debió ser ejecutado de principio a fin en una única máquina y, por lo tanto, el fraccionamiento de datos para la distribución de tareas en diferentes ordenadores se debió realizar manualmente por parte del autor de esta tesis. En total se utilizaron ocho módulos, el primero creado íntegramente con la herramienta *ModelBuilder* de ArcGIS® Desktop 10.x, siete en lenguaje de programación Python 2.7.x y dos en R-Project.

B.1.1. Cálculo de las impedancias para cada momento de salida en origen

El primer módulo fue creado íntegramente con la herramienta *ModelBuilder* de ArcGIS® Desktop 10.x y su propósito es la generación de un archivo en formato .csv que contenga los tiempos de viajes experimentados de cada relación O/D según los diferentes tiempos predefinidos de inicio de viajes.

Las rutas calculadas siguen el criterio FIFO, es decir, que se garantiza que el viaje que empieza antes debe acabar antes que cualquier otro que se inicie a posteriori, aunque estos

siguientes viajes tengan menor duración. El resultado de esta matriz se presenta en formato largo, es decir, cada registro es una pareja OD. Estos resultados se pueden usar directamente en los casos de estudio de los primeros cuatro artículos y constituye la base para calcular las matrices de impedancias necesarias para el artículo 5. En la Figura B.1, se ve el diagrama de flujo de este módulo (según como se conocen las herramientas en su versión en inglés).



Figura B.1. Diagrama de flujos de la herramienta construida en ModelBuilder para el cálculo de tiempos de viaje para cada momento de salida en origen.

La primera herramienta es el iterador que permite cambiar el valor del tiempo de inicio de los viajes de la matriz origen-destino según se defina en una tabla dBASE (archivo .dbf). El formato de estos tiempos tiene que ser día y hora o “dd/mm/YYYY HH:MM:SS”¹⁰³, en donde los domingo se representan como 31/12/1899, los lunes como 01/01/1900 y así sucesivamente hasta los sábados (06/01/1900). Cada hora y día de inicio es un registro de esta tabla.

Para los artículos 1, 2 y 3 se usó solamente los miércoles, para el artículo 4 todos los días de entre semana y para el artículo 5 los martes, miércoles y jueves. Por otro lado, se calcularon las matrices para cada 15 minutos desde las 00.00 hasta las 21.30 en todos los artículos menos en el cuarto, de 02.15/02.45 a 21.30/22.00 en el caso del cuarto artículo. En todos los casos, las últimas horas del día no se calculan porque, debido a la base de datos de TomTom utilizada¹⁰⁴, los valores de estas horas serán idénticos a los de la situación de flujo libre, valor ya obtenido en, al menos, dos resultados.

Sobre las primeras horas del día, en el primer caso, se calculan todas debido a que no existe limitación de tiempos de viajes de las rutas calculadas. Sin embargo, en el caso del artículo cuatro, se limita el cálculo a solo aquellas relaciones inferiores a menos de 90 minutos, de manera que se puede asegurar que un viaje que se inicia 91 minutos antes de que se empiecen a reportar los primeros valores con velocidades inferiores al 100% respecto a la

¹⁰³ Según formato explicado en (Python Software Foundation, n.d.)

¹⁰⁴ Véase sección 1.4.2.1.2.

velocidad en flujo libre será realizado íntegramente a velocidad de flujo libre.

Finalmente, es importante recordar que se ha impuesto que la primera matriz OD calculada y la última deben ser idénticas ya que ambas deben obtener los valores de viaje en flujo libre, los cuales representan el menor tiempo posible en unir dos relaciones. Se usan estas dos matrices para detectar errores relacionados con posibles relaciones mal calculadas.

La siguiente herramienta, llamada “*Make OD Cost Matrix Layer*”, genera la capa de cálculo de la matriz origen-destino y requiere la introducción de los parámetros que se mencionan a continuación. En general, se han mantenido los mismos parámetros en todos los casos de estudio, aunque hay casos en los que se han hecho pequeñas modificaciones. A continuación, se indica también la definición de cada uno de ellos en los diferentes casos de estudio.

- Se debe indicar cuál es el *Network Dataset* que contiene la información de la red, tal y como se explicó en la sección 1.4.2.1. (*Input Analysis Network*).
- Se debe indicar el nombre de la capa de cálculo. En todos los casos, se ha optado en mantener el nombre por defecto, puesto a que es un dato temporal en el desarrollo de esta herramienta. (*Output Layer Name*).
- Se debe indicar qué campo contiene el valor de las impedancias de cada arco. El algoritmo minimizará el valor de la suma de este campo para cada ruta. Para esta tesis se usa el campo *TravelTime*, campo explicado en la sección 1.4.2.1.3., que incluye dinámicamente la variación de impedancias en la red. (*Impedance Attribute*).
- Se puede indicar el valor máximo de impedancia que puede tener una ruta, no obteniendo valor si la ruta tiene un valor superior. A excepción del artículo 4, en el cuál se limitó a 90 minutos, en el resto de artículos no se aplicó ninguna limitación. (*Default Cutoff*).
- Se puede indicar el valor máximo de destinos que se quieren calcular para cada origen según su proximidad. En ninguno de los casos de esta tesis se limitó el número de destinos. (*Default Number of Destination to Find*).
- En caso de trabajar con redes dinámicas, se puede indicar la hora o día y hora de inicio de los viajes para los que se calcula la matriz. En caso de no indicar nada, se considerará la hora de iniciar el algoritmo. En el caso de este módulo, los valores de hora de salida de cada viaje vienen del iterador anteriormente explicado. (*Start Time*).
- Se puede especificar “acumuladores”, es decir, que valores relacionados con la ruta de otros campos que se quiere conocer, como por ejemplo el número de kilómetros

que implica la ruta más rápida, pese a que no han sido usados para el cálculo de las rutas de menor impedancia. En general, siempre se ha pedido el campo *Kilometers* como mínimo para poder obtener posteriormente los valores de velocidad real. (*Accumulators*)

- Se puede elegir el tipo de algoritmo de búsqueda de caminos mínimos a usar. Se puede elegir entre búsqueda exacta, mediante el algoritmo de Dijkstra, o si se prefiere el uso del algoritmo heurístico de jerarquías de la red. En esta sección se pueden definir otras jerarquías si así se desea¹⁰⁵. Todas las matrices origen-destino de esta tesis han sido calculadas usando el algoritmo heurístico de jerarquías. (*Hierarchy*)
- Permite elegir que restricciones disponibles (*Restriccions*) deben tenerse en cuenta para el cálculo de las relaciones OD¹⁰⁶.
- Permite elegir qué tipo de salida se prefiere, si sólo tabla de atributos (NO_LINES) o si se quiere incluir las líneas euclidianas resultados a la capa (STRAIGHT_LINES). Debido al gran volumen de relaciones que se obtienen en estas tesis, se optó por usar la primera opción. (*Output Options*)

Una vez generada la capa de cálculo para un Network Dataset y una hora de salida en concreto, se procede a introducir los puntos centroide de las zonas origen y los puntos centroide de las zonas destino mediante el uso de la herramienta *Add Locations*. Ambas capas pueden ser la misma, tal y como ocurre todos los cálculos realizados en esta tesis, puesto a que pueden no depender de los pesos que posteriormente se quieran aplicar. Pese al rol diferente de cada capa de puntos, se han definido de la misma manera los parámetros comunes:

- La capa de análisis de la red es la misma en cada caso. (*Input Network Analysis Layer*)
- El parámetro *Sub Layer* se define como *Origins* para la capa de puntos centroide de las zonas origen y como *Destinations* para la capa de puntos centroide de las zonas destino.
- En la sección de parámetros *Field Mapping*, se indica la identificación de cada punto según el campo correspondiente (*Name*), de manera que se permita realizar las uniones de tablas que se requieren a posteriori. El resto de opciones, que cambian según el tipo de Sub Layer que se introduce, se mantienen por defecto, incluyendo el que el punto puede ser abordado desde ambos lados de la calzada (*CurbApproach = Either side of vehicle*).

¹⁰⁵ Véase sección 1.4.2.1.3.

¹⁰⁶ Véase sección 1.4.3..

- El parámetro *Search Criteria* permite establecer la distancia euclidiana máxima a la que se puede reubicar cada centroide sobre la red con respecto a su posición original.
- El parámetro *Search Query* permite generar subconjuntos de arcos sobre los cuales se pueden reubicar los centroides sobre la red¹⁰⁷.

Una vez introducida la red y los puntos que representan las zonas origen y las zonas destino, la herramienta “*Solve*” calcula las rutas mínimas según los parámetros definidos en las herramientas anteriores. Los resultados serán incorporados a la capa de análisis creada previamente.

En este punto, de esta capa sólo interesan los valores de la tabla de atributos del elemento *Lines*, los cuales son extraídos mediante la herramienta “*Select Data*” y exportados finalmente a archivos .csv con la herramienta “*Export Feature Attribute to ASCII*”. Los nombres de los archivos .csv tienen una parte fija, que corresponden a la identificación del caso de estudio, y una parte variable, que corresponde en que iteración, es decir hora de salida, se ha calculado.

B.1.2. Cálculo de las impedancias para cada momento de llegada a destino

En el artículo 5, debido al uso de destinos cuyas oportunidades cambian a lo largo del día, el interés de las matrices de impedancias ya no se centra en el momento de salida de cada viaje sino en el momento de la llegada a cada destino. Estos valores se pueden obtener de los resultados anteriores puesto a que se conoce la hora de salida y tiempo de viaje de cada relación. Sin embargo, las horas de llegada obtenidas de esta transformación no tienen por qué estar redondeados a valores que, de interés, lo cual puede complicar la forma de proceder.

Debido a que las rutas calculadas en el módulo anterior siguen el criterio FIFO que no altera el orden de llegada de los viajes, el primero que sale es el primero que llega, y que, al unir los valores obtenidos en destino, se puede obtener una función continua y derivable, se pueden obtener valores en destino según la hora que se desee mediante técnicas de interpolación.

Para conseguir transformar los resultados del módulo anterior en valores aptos para el artículo 5 se requiere el uso de dos scripts programados para este problema en Python 2.7.x de 32bits, incluida en ArcGIS® Desktop 10.x y que limita a 4Gb el uso de la memoria del ordenador:

¹⁰⁷ Véase sección 1.4.3.

- El primer script reordena y redistribuye los valores de las diferentes matrices obtenidas del módulo anterior en tantos archivos .csv como zonas destino. Cada registro del archivo resultante contiene los valores de los tiempos de viaje a lo largo del periodo de estudio para un origen concreto en relación con el destino del archivo. Este script se creó porque los resultados exceden la memoria disponible.
- El segundo script es el que realiza el trabajo de interpolación mediante el uso de la librería *scipy* para Python. Este script lee los archivos generados en el script anterior, referencia los valores de la impedancia de cada relación origen-destino para cada hora estimada de llegada a destino, genera una curva de una dimensión mediante interpolación¹⁰⁸ de los resultados. Finalmente, estima el valor de la impedancia según horas de llegada predefinidas.

Los resultados se presentan con la misma estructura que se usa en el módulo anterior, de manera que los módulos posteriores no deben ser modificados para obtener los valores de accesibilidad. El nombre del archivo hace, en este caso, referencia a la hora de llegada a destino, y no a la hora de salida en origen tal y como ocurre en el módulo anterior.

B.1.3. Comprobación de consistencia de las impedancias

Uno de los criterios de calidad usados en esta tesis para comprobar que los procesos han sido bien ejecutados es el de garantizar el valor mínimo para cada perfil sea el que se reporta en un archivo en el cual todas las rutas y valores de impedancia puedan inequívocamente asociarse al resultado que se puede obtener en flujo libre. En todos los casos de estudio de esta tesis el escenario de menor impedancia corresponde al primer archivo de cada perfil.

Este módulo requiere saber el archivo con el valor de impedancia en flujo libre y la carpeta donde se encuentran el resto de archivos. El archivo resultado indica que relaciones no cumplen la condición anteriormente descrita.

¹⁰⁸ La función obtenida deberá obtener el mismo par de valores antiimagen – imagen que los usados para definirla.

B.1.4. Estimación de los parámetros de la *función de disuasión según impedancia*

Para la estimación de los parámetros de las *funciones de disuasión según impedancia* usadas en la tesis se programaron 2 módulos en Python y 2 módulos en R-Project. Para cada caso se emplearon algunos de los módulos tal y como se describe a continuación.

La IDF-a, usada en los tres primeros artículos, es la única de las tres funciones que requirió el uso de dos módulos para su calibración.

En la primera etapa se usó un módulo de Python basado en los procesos iterativos para la estimación del número de viajes que permite obtener los vectores de coeficientes de balanceo A, B y ζ de la ecuación 1.18, mediante el proceso de Furness modificado (Furness, 1965). El módulo recibe los viajes observados de cada relación y el valor de la impedancia asociados a ellos desde un archivo .csv, y es ejecutado tras la definición de dos criterios de parada y la generación de grupos de impedancias.

Respecto a los criterios de paradas, el primer criterio hace referencia al número máximo de iteraciones permitidas, y el segundo hace referencia a la diferencia mínima entre valor absoluto que tenían que tener los vectores con los coeficientes de balanceo.

Respecto a la generación de los grupos de impedancias, este módulo sólo permite generar grupos de igual diferencia de tiempos, estableciendo el número de grupos a generar, el intervalo entre impedancias límite de cada grupo, así como se debe indicar si se deben tener en cuenta los viajes dentro de una misma zona.

Al finalizar el proceso se generan tres archivos .csv: el primero contiene los vectores de los coeficientes de balanceo A y B, uno para cada zona. El segundo contiene el vector de coeficientes de balanceo ζ para grupo de impedancias, y el tercero contiene los vectores de valores observados y estimados con los coeficientes de balanceo obtenidos para poder determinar la calidad de la calibración.

De la ejecución del primer módulo ya se obtiene una primera posible *función de disuasión según impedancia* con los coeficientes de balanceo ζ , sin embargo esta es una función no continua, estando definida a trozos, y que evalúa con el mismo peso ponderador cualquier relación que esté dentro de un grupo concreto pese a que puede haber mucha variación entre

sus impedancias. Para resolver este problema se decide usar esos valores para calibrar una función continua del tipo exponencial negativa mediante un script de R-Studio.

Se procede a la linealización de la función y la calibración de sus parámetros según una regresión lineal simple por el método de los mínimos cuadrados, tal y como se muestra en la Ecuación B.1. Nótese como se ha eliminado el término independiente, con el fin de garantizar que los valores de la función exponencial resultante son únicamente dependientes del valor de la impedancia y, por lo tanto, estarán comprendidos entre 0 y 1.

$$\log \zeta_s = \theta_a \cdot \bar{c}_s + \varepsilon \quad \text{Ec. B.1}$$

La función IDF-c, la que se usa en el quinto artículo, utiliza una modificación del módulo de Python usado en la función IDF-a con el mismo tipo de inputs. En este caso, se ha adaptado el proceso iterativo según el proceso de Hyman (Luis & Berodia, 2006). Como resultado, el segundo de los archivos resultado solamente contiene el valor del parámetro de la función exponencial negativa.

Para la función IDF-b, se usó solamente un módulo en R-Project que explora la forma de las funciones de supervivencia que se obtienen de los valores obtenidos de agregaciones de bases de datos con microdatos de entrevistas de encuestas de transporte y de su correcta expansión, según la propuesta de Skov-Petersen (2001).

Este módulo recibe la información de un archivo de agregaciones en formato .csv para un día de la semana, en el que cada campo hace referencia a un motivo de viaje, incluyendo un campo que es la suma de todos los motivos y cada registro hace referencia al tiempo reportado por el entrevistado. El valor de cada un registro para un campo concreto, hace referencia al número de viajes reportados según la muestra expandida.

El módulo obtiene funciones de supervivencias calibradas por regresiones no lineales para un conjunto de posibles *funciones de disuasión según impedancia* adecuadamente especificados dentro de la rutina *nlm* de R-project.

El resultado es un archivo .csv en el que se lista, para cada posible *función de disuasión según impedancia*, el respectivo valor AIC y de error, el valor calibrado para cada parámetro de la función, así como su desviación estándar, el valor del t-test, el valor del p-value, y los valores límites que defienden el intervalo de confianza del 95% de la calibración a dos colas.

B.1.5. Obtención del valor de accesibilidad

El cálculo del valor de la accesibilidad para cada zona se obtiene mediante un módulo en Python 2.7.x. Este módulo combina los datos sobre los valores de las oportunidades en cada zona y las pondera según el tipo de algún tipo de función predefinidas en el módulo a elegir. Se pueden obtener resultados de accesibilidad potencial, si se elige como función de ponderación a las *funciones de disuasión según impedancia*¹⁰⁹ potencial negativa, exponencial o log-logística, o el valor medio de las impedancias (Ec. 1.40). En caso de que la función requiera algún parámetro, este debe ser también especificado en la forma que se explica en el propio módulo.

Los valores de la impedancia se incorporan indicando en que carpeta está cada uno de los archivos en formato .csv, uno por momento que se haya calculado, que contiene ese dato para cada relación. En este punto, se debe indicar cuál es el campo, de todos los que puede contener cada archivo, que contiene la información sobre el nombre de la ruta y el valor de impedancia a usar. Los nombres de los archivos deben poder permitir clasificar estos archivos de hora más temprana a hora más tardía del día al leerse estos en orden alfabético, para poder realizar automáticamente los perfiles.

Los valores de las oportunidades se introducen mediante un archivo .csv en el que se debe indicar el identificador de la zona, debiendo corresponder exactamente con el valor asignado para la identificación de punto origen o destino en el momento de generar las rutas, y uno o varios valores de oportunidades, según si ésta es constante o variable a lo largo del tiempo. En caso de indicar más de un valor, el número de valores debe coincidir con el número de rutas que se introducen, puesto a que el orden de los campos de oportunidades se relaciona con el orden como se leen los archivos que contienen las impedancias.

El resultado que se obtiene se guarda en un archivo .csv cuyo nombre y ruta deben haberse especificado previamente y en el que, los tres primeros campos de este archivo hacen referencia a la indicación de que zona se trata cada registro, del valor de las oportunidades usado (si solo hay uno) y otro valor propio de la zona pensado para posteriores ponderaciones. El resto de campos, cuyos nombres hacen referencia al respectivo nombre del archivo de impedancias usado para calcular esos valores, indican el valor absoluto de la

¹⁰⁹ Véase sección 1.3.1.4 y anexo C

accesibilidad.

Los resultados de este módulo han sido generados íntegramente dentro del entorno Python, aunque este módulo también ha sido adaptado y presentado en formato herramienta del ArcToolBox para ArcGIS® Desktop para facilitar su manejo entre otros investigadores y usuarios, según se ha requerido disponerlo. Los resultados de ambas versiones siempre son iguales puesto a que lo único que cambia es la forma de como indicar las rutas a las carpetas y archivos que debe leer y escribir. No se han realizado cambios a nivel de cálculos.

Nótese como este módulo ha sido pensado para los casos expresados en esta tesis, de manera que si el valor de las oportunidades es único se puede usar para la obtención de perfiles de accesibilidad basados en hora de salida u hora de llegada, pero si se añade más de un valor, estos solo pueden ser usados para perfiles basados en hora de llegada.

B.2. Herramientas de análisis de los resultados

Los módulos anteriores permiten obtener una serie de varios archivos, uno para cada caso de estudio y escenario, que contiene los datos de los perfiles de accesibilidad en valor absoluto. Para poder tratar esos datos, realizar una serie de cálculos que permiten llevar a cabo cualquiera de los análisis que se plantean, y el preparar los nuevos resultados para ser fácilmente usados en ArcGIS se ha preparado específico de Python, y otro en R-project. Finalmente, también se ha generado en Python otro módulo que permite generar las capturas de imágenes para realizar algunas animaciones.

B.2.1. Generación de valores globales, perfiles normalizados y valores estadísticos generales

Este primer módulo, en Python, permite tratar los perfiles de valores de accesibilidad en valor absoluto debido a que realiza operaciones comunes para todos los casos de estudios con dichos valores. Este módulo lee los archivos .csv obtenidos del módulo anterior y devuelve los nuevos cálculos en archivos de Excel (.xls), uno para cada uno de los archivos de perfiles leídos. La generación de archivos de Excel permite trabajar con su asistente de creación de gráficos además de poder usar sus hojas en el entorno de ArcGIS® Desktop.

Para usarlo, se debe especificar la ruta de la carpeta con los archivos de los perfiles y cuyos

formatos son idénticos¹¹⁰. Además, se debe especificar el campo que contiene la identificación de cada zona, el campo de ponderación, el campo de otra información zonal adicional -el cual puede ser usado para agregaciones a entidades de rango superior si así se indica en este módulo, y el primer campo que contiene información del perfil. Además hay que especificar si el perfil está completo o si faltan los datos referentes a las últimas horas del día¹¹¹, que corresponden a resultados de flujo libre ya calculado.

También, se debe especificar la ruta de la carpeta que alojará el resultado. En nombre el archivo hará referencia al nombre del archivo .csv usado para cada caso. Además, se debe especificar el nombre y el tipo de análisis que se desea hacer para cada hoja del archivo Excel.

Los análisis que se pueden llevar a cabo son:

- Importar el archivo .csv al archivo .xls.
- Normalizar los perfiles a valores relativos para cada zona, siendo el valor de referencia el que pertenecer al primer campo de los datos del perfil, el que hace referencia a la accesibilidad en flujo libre.
- Obtener el perfil del valor de autopotencial de cada zona a lo largo del periodo de estudio.
- Calcular el total de población, u otro indicador según categorías previamente definidas, según porcentaje de accesibilidad relativa, a lo largo del día.
- Calcular estadísticas básicas de los perfiles de cada zona:
 - Valor absoluto mínimo de accesibilidad.
 - Valor absoluto correspondiente al percentil 10 de accesibilidad.
 - Valor absoluto correspondiente al percentil 20 de accesibilidad.
 - Valor absoluto correspondiente al primer cuartil (percentil 25).
 - Valor absoluto mediano (segundo cuartil y percentil 50).
 - Valor absoluto correspondiente al tercer cuartil (percentil 75).
 - Valor absoluto correspondiente al percentil 80 de accesibilidad.
 - Valor absoluto correspondiente al percentil 90 de accesibilidad.
 - Valor absoluto máximo de la accesibilidad.

¹¹⁰ Si no es así, el programa puede obtener resultados realizar cálculos completamente erróneos pero que, a nivel de operaciones matemáticas, no conlleven error.

¹¹¹ En la versión 1 de HSP todos los arcos reportan velocidad en flujo libre a partir de las 21.20 y en la versión 2 a partir de las 21.50. Cualquier ruta calculada entre esa hora y el fin del día está en escenario de flujo libre, cuyo valor ya ha sido calculado previamente.

- Valor absoluto de la media aritmética de la accesibilidad.
- Valor absoluto de la desviación estándar de los valores del perfil de accesibilidad.
- Coeficiente de variación de cada perfil.
- Valor de la división Percentil 10 entre Percentil 90.
- Valor de la división Percentil 20 entre Percentil 80.
- El rango intercuartílico (Tercer cuartil menos primer cuartil)
- El valor de la división del valor mínimo entre el valor máximo (peor valor relativo)
- El total de horas en las que el perfil reporta valores inferiores al valor medio
- El total de horas en las que el perfil reporta valores inferiores al valor medio menos una desviación estándar
- El total de horas en las que el perfil reporta valores inferiores al valor medio más una desviación estándar
- Hora de menor accesibilidad
- Valor absoluto mínimo de la accesibilidad de las horas de la mañana [00.00, 12.00)
- Valor absoluto mínimo de la accesibilidad de las horas de la tarde y noche [12.00, 24.00)
- Diferencia en valor absoluto entre el valor mínimo de la mañana y el valor mínimo de la tarde y noche.
- Valor relativo mínimo de la accesibilidad de las horas de la mañana [00.00, 12.00)
- Valor relativo mínimo de la accesibilidad de las horas de la tarde y noche [12.00, 24.00)
- Valor normalizado de la diferencia entre el valor relativo mínimo de la mañana y el de la noche ¹¹².
- Valor máximo de accesibilidad autopotencial relativa.
- Valor máximo de accesibilidad autopotencial relativa de la mañana [00.00, 12.00).
- Valor máximo de accesibilidad autopotencial relativa de la tarde y noche [12.00, 24.00).
- Valor mínimo de accesibilidad autopotencial relativa.

¹¹² $\frac{\text{mejor valor} - \text{peor valor}}{1 - \text{peor valor}}$

- Relación del valor máximo de la accesibilidad de la zona con respecto al de la zona con mayor valor máximo de accesibilidad
- Obtener valores absolutos de accesibilidad medios para una serie de períodos, previamente especificados que campos perteneces a dichos periodos.
- Obtener valores relativos de accesibilidad medios para una serie de períodos, previamente especificados que campos perteneces a dichos periodos.
- Obtener el perfil agregado del archivo, tanto en valor absoluto como en valor relativo.

B.2.2. Asignación de perfiles según categorías

Con el fin de presentar los perfiles de accesibilidad de manera similar al cómo se presentan los datos en el producto HSP, es decir, mediante la asignación de los diferentes perfiles observados a otro perfil predefinido, se ha programado un módulo en R-Project que pueda hacerlo. Este módulo utiliza la librería Kml (Genolini & Falissard, 2011).

Como inputs se debe añadir primeramente el archivo .csv con los perfiles que son definidos como perfiles predeterminados, en el formato de cada registro es un perfil, del mismo modo se deben añadir los perfiles que deben ser asignados a los perfiles predeterminados. Se debe definir si se quiere una asignación única y automática (asignado al perfil predefinido al que mayor probabilidad de pertenecían tiene), o si se prefiere conocer el grado de probabilidad de pertenecer a cada perfil predefinido y que sea el usuario quien decida. Todos los resultados se presentan en un archivo .csv, cuya ruta debe haber sido especificada antes de iniciar el proceso de este módulo.

B.2.3. Generación de animaciones

El último de los módulos programados en Python exporta una secuencia de layouts - fotogramas de ArcGIS® Desktop para poder usarlos posteriormente en PhotoScape y generar animaciones.

Este módulo requiere haber realizado previamente en ArcGIS® Desktop la maquetación del layout (posición de cada elemento) que forma cada fotograma de la aplicación, guardado en un archivo .mxd. Este paso incluye la definición de la posición y tamaño de los elementos estáticos como pueden ser escalas, meridiana, textos y otras capas estáticas (activas), y los elementos dinámicos como son los cronómetros (texto) y el conjunto de capas estáticas que formarán los elementos dinámicos.

El dinamismo de las capas se obtiene mediante la activación y desactivación de cada capa estáticas, de manera secuencial. Es por ello que se debe añadir al layout tantas capas con los resultados que varían a lo largo de la animación como fotogramas hay y cuyo nombre debe tener una parte común y una variable capaz de indicar el orden de la generación de los fotogramas en orden alfabético. Estas capas deben estar desactivadas en el momento de salvar el archivo .mxd. Todas las capas del mismo elemento dinámico deben contener los datos que deben ser representados en un campo de nombre común.

Al módulo requiere como valor input la ruta del archivo .mxd, el nombre genérico de la capas con la información dinámica, el intervalo de tiempo real entre cada fotograma (para generar el cronometro) y la ruta del archivo .lyr de simbología, el cual debe estar definido con el nombre el campo común de los valores a representar de cada capa. Como valores output, se debe indicar la ruta de la carpeta en la que se deben guardar los fotogramas exportados, el tipo de archivo de la exportación (.emf, .ems, .ai, .pdf, .svg, .bmp, .jpeg, .png, .tiff, o .gif) y la resolución.

Bibliografía Anexo B

- Furness, K. P. (1965). Time function iteration. *Traffic Engineering and Control*, 7(7), 458–460.
- Genolini, C., & Falissard, B. (2011). Kml: A package to cluster longitudinal data. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 104(3), e112–e121. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2011.05.008>
- Luis, J., & Berodia, M. (2006). Dos Modelos de Distribución de Viajes: Modelo de Entropía (Hyman) versus Triproporcional a través de una aplicación en la Ciudad de Concepción (Chile) Application in the city THE City de Concepcion (Chile). *Revista de Obras Públicas*, 3462, 33–40.
- Python Software Foundation. (n.d.). 15.3. time — Time access and conversions. Retrieved March 5, 2015, from <https://docs.python.org/2/library/time.html>
- Skov-Petersen, H. (2001). Estimation of distance-decay parameters-GIS-based indicators of recreational accessibility. *ScanGIS*, 237–258. <https://doi.org/10.1.1.5.6180>

Anexo C. Funciones de disuasión según impedancia

Función	$f(c_{ij}, \theta)$	Comentarios
Box-cox	$e^{\frac{\theta_1 \cdot (c_{ij}^{\theta_2} - 1)}{\theta_2}}$	
Box-tukey	$e^{\frac{\theta_1 \cdot ((c_{ij} + \theta_3)^{\theta_2} - 1)}{\theta_2}}$	
Doble exponencial	$e^{\theta_1 c_{ij}} + \theta_2 \cdot e^{\theta_3 c_{ij}}$	
Doble potencial negativa	$\frac{1}{c_{ij}^{\theta_1} + \theta_2 \cdot c_{ij}^{\theta_3}}$	
Empírica – triporcional o por bloques	$\begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq c_{ij} \leq \theta_1^{\text{sup}} \\ b_{\eta} \in (0, 1) : b_{\eta-1} > b_{\eta} > b_{\eta+1} & \text{si } \theta_{\eta}^{\text{inf}} < c_{ij} \leq \theta_{\eta}^{\text{sup}} \\ 0 & \text{si } \theta_{\eta_{\text{ult}}}^{\text{sup}} < c_{ij} < \infty \end{cases}$	<p>En donde b_{η} el valor entre 0 y 1 que corresponde al η-ésimo bloque entre dos límites de impedancias y η_{ult} es el último bloque con valor $b_{\eta} \in (0, 1)$</p> <p>Se puede considerar como un híbrido entre la <i>función de disuasión según impedancia</i> y la función que se usa en las medidas de contorno. Esta función se obtiene de añadir una limitación más en la función X.</p>
EVA 1	$(c_{ij} + 1)^{\frac{\theta_1}{1 + e^{\theta_2 + \theta_3 \cdot c_{ij}}}}$	Se usa en técnicas de los 4 pasos que incluyen la distribución y el reparto modal en un único paso
EVA 2	$\frac{1}{\left(\left(\frac{c_{ij}}{\theta_1}\right)^{\theta_2} + 1\right)^{\theta_3}}$	Se usa en técnicas de los 4 pasos que incluyen la distribución y el reparto modal en un único paso. Si $\theta_3 = 1$ se le llama, función de Schiller
Exponencial	$e^{\theta c_{ij}}$	La valoración del viaje no depende del total de tiempo de viaje. Usada especialmente en estudios urbanos
Exponencial normal	$e^{\theta \cdot c_{ij}^2}$	También se le ha llamado gaussiana modificada si se multiplica toda la función por una constante, por ejemplo 100.
Exponencial raíz cuadrada	$e^{\theta \cdot \sqrt{c_{ij}}}$	
Lohser	$e^{\theta \cdot \left(1 + \frac{c_{ij}}{\min c}\right)^2}$	Usado para movilidad de transporte público
(Log)logística modificada	$\frac{1}{1 + e^{\theta_1 + \theta_2 \cdot \ln(c_{ij})}} = \frac{1}{1 + e^{\theta_1} \cdot c_{ij}^{\theta_2}}$	Las dos formas son iguales, siendo la de la izquierda la observada en trabajos previos. Sin embargo, la forma de la

		derecha omite una componente logarítmica que puede llevar a confusión en caso de $c_{ij} = 0$
Log Normal	$e^{\theta \cdot (\ln(c_{ij}+1))^2}$	
Potencial negativa (Pareto)	$e^{-\theta \cdot \ln(c_{ij})} = c_{ij}^{-\theta} = \frac{1}{c_{ij}^{\theta}}$	La valoración del tiempo de viaje es una función logarítmica. Las penalizaciones por tiempo extra de viaje disminuyen a medida que el tiempo de viaje es mayor. Usada principalmente en estudios interurbanos.
Tanner (1961)	$c_{ij}^{\theta_1} \cdot e^{\theta_2 c_{ij}}$	Combina el comportamiento de las funciones exponenciales negativas y de las potenciales negativas. También es llamada general, puesto a que si uno de los parámetros es 0, se obtiene la función exponencial negativa o la potencial negativa.
Top Log Normal	$e^{\theta_1 \cdot \left(\ln\left(\frac{c_{ij}}{\theta_2}\right)\right)^2}$	

Tabla C.1. Funciones de disuasión según impedancias. Fuentes: Geurs y Van Wee (2001), Reggiani, Bucci y Russo (2011) y Shrewsbury (2012).

Bibliografía Anexo C

- Geurs, K. T., & Ritsema van Eck, J. (2001). Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact. Bilthoven (Netherlands). Retrieved from <https://rivm.openrepository.com/rivm/handle/10029/9487>
- Reggiani, A., Bucci, P., & Russo, G. (2011). Accessibility and Impedance Forms: Empirical Applications to the German Commuting Network. *International Regional Science Review*, 34(2), 230–252. <http://doi.org/10.1177/0160017610387296>
- Shrewsbury, J. (2012). Calibration of trip distribution by generalised linear models (NZ Transport Agency). Retrieved from <http://www.nzta.govt.nz/resources/research/reports/473/docs/473.pdf>
- Tanner, J. C. (1961). Factors affecting the amount of travel. HM Stationery Office.

Anexo D. Niveles de servicio

Los niveles de servicio han sido una herramienta de planificación del rendimiento objetivo de las nuevas infraestructuras y criterio para iniciar una actuación en aquellas de ya existentes que ya no cumplen con los requisitos mínimos. Estos criterios también han sido usados en medidas de accesibilidad basados en infraestructuras tal y como se ha comentado anteriormente.

El sistema de evaluación por niveles de servicio se basa en convertir los resultados numéricos en diferentes categorías que permita rápidamente asociar la calidad del servicio. Se ha optado en general por dividir los niveles de servicio en 6 categorías diferentes según se puede ver en la Tabla E.1., siendo la F la que indica que los vehículos se encuentran en congestión y, por lo tanto, un nuevo vehículo implica una reducción del flujo. De la misma manera, se pueden encontrar metodologías similares para valorar la calidad del servicio para las intersecciones, enlaces, carriles bici, zonas peatonales y transportes públicos entre otros.

LOS	Autopistas (TRB, 2000, pp. 13–8)	Calles (TRB, 2000, pp. 10–5)
A	Flujo libre. Los vehículos casi no tienen impedimentos para realizar maniobras en el flujo de tráfico. Los efectos de incidentes son fácilmente absorbidos en este nivel	La velocidad media es, como mínimo, del 90% de la velocidad en flujo libre. Los vehículos pueden realizar sin problemas maniobras en el flujo de tráfico. Los retrasos por intersecciones con semáforos son mínimas
B	Situación similar a flujo libre. Los vehículos apenas tienen impedimentos para realizar maniobras en el flujo de tráfico. El nivel de confort físico y psicológico es aún alto. Los efectos de incidentes son fácilmente absorbidos en este nivel	La velocidad media es, como mínimo, del 70% de la velocidad en flujo libre. Los vehículos apenas tienen impedimentos para realizar maniobras en el flujo de tráfico y los retrasos por intersecciones con semáforos no son significantes
C	Velocidad próxima a la de flujo libre. La libertad de maniobra de los vehículos está notablemente reducida. Incidentes menores pueden ser absorbidos pero el deterioro local en el servicio puede ser sustancia. Se puede esperar que se forme alguna cola.	Situación estable. Sin embargo, la capacidad de maniobrabilidad está más restringida que en el LOS B, las colas son más largas y los retrasos por intersecciones con semáforos empiezan a ser significantes. La velocidad media es, como mínimo, del 50% de la velocidad en flujo libre.
D	La velocidad empieza a descender de manera significativa y la densidad del tráfico a aumentar. La libertad de maniobra de los vehículos es muy reducida y el nivel de confort físico y psicológico se reduce. Incidentes menores pueden provocar colas puesto a que el flujo de tráfico tiene poca capacidad de absorber perturbaciones.	Situación en la que pequeños incrementos de flujo pueden provocar importantes retrasos y disminuciones de velocidad. La velocidad media es, como mínimo, el 40% de la velocidad en flujo libre

LOS	Autopistas (TRB, 2000, pp. 13–8)	Calles (TRB, 2000, pp. 10–5)
E	La vía opera a su capacidad. La circulación en este nivel es volátil puesto a que no hay huecos para el tráfico. Cualquier perturbación del flujo provoca cambios de estado aguas arriba. En este nivel, el flujo de tráfico no tiene capacidad para dispersar los efectos de cualquier incidente, por menor que sea. La maniobrabilidad dentro del tráfico es extremadamente limitada y el nivel de confort físico y psicológico es pobre.	Situación que se caracteriza por una velocidad media del 33% de la velocidad en flujo libre o inferior.
F	Este nivel describe la vía en situación de congestión.	Situación de velocidades extremadamente bajas, inferiores al 33% de la velocidad en flujo libre. Los retrasos son elevados y las colas largas.

Tabla E.1. Definición de los diferentes niveles de servicio para autopistas y calles urbanas según el Highway Capacity Manual 2000 (TRB, 2000).

Bibliografía Anexo D

TRB. (2000). Highway capacity manual. TRB. Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/rpo/rpo.trn129.pdf>

Anexo E. Congresos y seminarios en los que se ha expuesto material de la tesis doctoral

García-Palomares, J.C., Moya-Gómez, B. (2014) Impacto de la congestión urbana en la accesibilidad territorial: un análisis usando Speed Profile de TomTom. Conferencia ESRI 2014. Del 22 al 23 de octubre de 2014. Madrid (España, UE).

García-Palomares, J.C., Moya-Gómez, B. (2014). Sistemas de información geográfica y nuevos datos en el estudio de la accesibilidad en espacios metropolitanos. III Congreso internacional de ordenamiento territorial y tecnologías de la información geográfica. Del 15 al 18 de septiembre de 2014. Buenos Aires (Argentina).

García-Palomares, J.C., Gutiérrez, J., Salas-Olmedo, M.H., Moya-Gómez, B. (2015). Dynamic accessibility analysis using big data. ERSA 55th Congress. Del 25 al 28 de agosto de 2015. Lisboa (Portugal, UE).

García-Palomares, J.C., Moya-Gómez, B., Gutiérrez, J. (2017). Análisis dinámico de la accesibilidad usando BigData. XLIII Reunión de Estudios Regionales. Del 15 al 17 de noviembre de 2017. Sevilla (España, UE)

Moya-Gómez, B (2014). El Impacto de la congestión urbana en la accesibilidad territorial. IV Jornadas de Investigación de Geografía. 27 de febrero de 2014. Madrid (España, UE).

Moya-Gómez, B., García Palomares, J.C. (2014). El impacto de la congestión urbana en accesibilidad territorial en las grandes ciudades europeas. PANAM 2014. Del 11 al 13 de junio de 2014. Santander (España, EU).

Moya Gómez, B., García Palomares, J. C. (2014). Introducing time variation of infrastructure performance in accessibility measures. How can road congestion influence accessibility in large European cities? NECTAR Cluster 6 Meeting. Accessibility and Policy Making. Del 6 al 7 de febrero de 2014. Sevilla (España, EU).

Moya-Gómez, B., Geurs, K.T. (2015). The observed road performance data in the Netherlands. An analysis of changes in car accessibility daily patterns. ERSA 55th Congress. Del 25 al 28 de agosto de 2015. Lisboa (Portugal, UE).

Moya-Gómez, B. (2015). Las nuevas fuentes de información geolocalizada en la movilidad urbana. Cursos de Verano del Escorial 2014. Del 20 al 24 de julio de 2015. San Lorenzo del Escorial (España, Madrid).

Moya-Gómez (2016). Representación dinámica de la accesibilidad: el caso de la congestión.
VI Jornadas de Investigación Geografía. Del 25 al 26 de febrero de 2015. Madrid
(España, UE).

Anexo F. Primera y última página de los artículos publicados

Working with the daily variation in infrastructure performance on territorial accessibility. The cases of Madrid and Barcelona

Borja Moya-Gómez¹ · Juan Carlos García-Palomares¹

Received: 29 August 2014 / Accepted: 15 May 2015

© The Author(s) 2015. This article is published with open access at SpringerLink.com

Abstract

Purpose Accessibility measurements are good tools for analysing the performance of possible policies on land use / transport / society systems. Until now, accessibility has been approached from a static perspective, even when variations in it depend on short term temporal changes in network function. Solutions based on static measurements, with journey costs taken as units based on free-flow travel time; do not reflect real network performance at different times of the day.

Methods In order to broaden our understanding of accessibility and study real-world dynamism in depth, information from new sources has been incorporated into traditional accessibility measurements, with actual observed data on the daily variations in speed profiles. These variations have been used to assess the impact of congestion on accessibility, with dynamic scenarios calculated every 15 min.

Results The variations in daily accessibility in the metropolitan areas of Madrid and Barcelona (Spain) have been mapped with reasonable computational costs. Although both cities have a similar global behaviour pattern, each has a different

daily spatial accessibility distribution. Madrid appears to be more resilient than Barcelona.

Conclusions With new technologies it is possible to overcome previous technical barriers, such as the lack of reliable information or calculating capacity. An ordinary computer has been used to obtain complete and detailed temporal profiles of the two traditional accessibility measurements. Thanks to these new measurements, we have a better understanding of accessibility. However, in order to express a dynamic phenomenon in static format, appropriate mapping schemes would have to be devised.

Keywords Daily accessibility · Dynamic impedance · GNSS · GIS

1 Introduction

In recent decades, the concept of accessibility has gradually gained importance. It has proved to be a useful tool for understanding the functioning of land use / transport / society systems and also for measuring the scope of human activity relations at territorial level. Accessibility is one element to consider in decision-making involving any action or policy that may influence the performance of this system. This is how it has been understood by numerous governments, who have incorporated accessibility in their territorial planning policies. Among the examples most frequently quoted are those of the Netherlands, with their ABC philosophy [1], the United Kingdom, which introduced accessibility as a strategic objective in its national policy in 1994 [2], and the European Union, which includes accessibility as an objective in its spatial development perspective [3].

Although accessibility is a widely used concept in various fields of science, it is usually misunderstood [4] and may even

This article is part of the Topical Collection on Accessibility and Policy Making

Electronic supplementary material The online version of this article (doi:10.1007/s12544-015-0168-2) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ Borja Moya-Gómez
bmoyagomez@ucm.es

Juan Carlos García-Palomares
jcgarcia@ghis.ucm.es

¹ Transport, Infrastructure and Territory Research Group (t-GIS), Human Geography Department, Faculty of Geography and History, Universidad Complutense de Madrid (UCM), c/ Profesor Aranguren S/N, 28040 Madrid, Spain

22. Bertolini L, le Clercq F, Kapoen L (2005) Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use planning. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transp Policy* 12:207–220. doi:10.1016/j.tranpol.2005.01.006
23. Gutiérrez J, Urbano P (1996) Accessibility in the European Union: the impact of the trans-European road network. *J Transp Geogr* 4: 15–25. doi:10.1016/0966-6923(95)00042-9
24. Ben-Akiva M (1985) Dynamic network equilibrium research. *Transp Res A Gen* 19:429–431. doi:10.1016/0191-2607(85)90042-1
25. Chiu Y-C, Bottom J, Mahut M et al. (2011) Dynamic traffic assignment. A Premier. Transport Research Circular E-C153. Washington, DC (USA)
26. Wu Y-H, Miller HJ, Hung M-C (2001) A GIS-based decision support system for analysis of route choice in congested urban road networks. *J Geogr Syst* 3:3–24. doi:10.1007/PL00011466
27. Dijkstra EW (1959) A note on two problems in connexion with graphs. *Numer Math* 1:269–271. doi:10.1007/BF01386390
28. Chabini I (1998) Discrete dynamic shortest path problems in transportation applications: complexity and algorithms with optimal Run time. *Transp Res Rec* 1645:170–175. doi:10.3141/1645-21
29. Dean B (2004) Shortest paths in FIFO time-dependent networks: theory and algorithms. Rapport technique, Massachusetts Institute of Technology. Boston (USA)
30. Eurostat (2011) Local Administrative Units (LAU). http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/nuts_nomenclature/local_administrative_units. Accessed 20 Jan 2014
31. European Environment Agency (2007) EEA reference grids. Permalink to this version: 9B755D9F-8B6B-4CE0-9270-0963E10B2FC8. Accessed 20 Jan 2014
32. Eurostat (2006) Population Distribution - Demography. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco_Geographical_information_maps/popups/references/population_distribution_demography. Accessed 20 Jan 2014
33. ESPON (2014) ESPON 2013 Database Dictionary of Spatial Unites. http://database.espon.eu/db2/jsf/DicoSpatialUnits/DicoSpatialUnits_onehtml/index.html. Accessed 20 Jan 2014
34. Furness KP (1965) Time function iteration. *Traffic Eng Control* 7: 458–460
35. Ortúzar JD, Willumsen LG (2011) Modelling transport, 4th edn. John Wiley & Sons, West Sussex
36. INE (2004) Population and Housing Census 2001. http://www.ine.es/en/censo2001/index_en.html. Accessed 10 Dec 2013
37. Frost ME, Spence NA (1995) The rediscovery of accessibility and economic potential: the critical issue of self-potential. *Environ Plan A* 27:1833–1848. doi:10.1068/a271833
38. ESRI (2014) About network analysis with hierarchy. <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//004700000057000000>. LastaccessedonJanuary21. Accessed 25 Feb 2014
39. TomTom (2013) Speed profiles. http://www.tomtom.com/en_gb/licensing/products/traffic/historical-traffic/speed-profiles/#tab:tab1. Accessed 20 Jan 2014
40. Levine J, Garb Y (2002) Congestion pricing's conditional promise: promotion of accessibility or mobility? *Transp Policy* 9:179–188. doi:10.1016/S0967-070X(02)00007-0
41. Handy S (2005) Smart growth and the transportation-land use connection: what does the research tell us? *Int Reg Sci Rev* 28:146–167. doi:10.1177/0160017604273626
42. Milego R, Ramos MJ (2013) Disaggregation of socioeconomic data into a regular grid and combination with other types of data. Technical Report ESPON



The daily dynamic potential accessibility by car in London on Wednesdays

Borja Moya-Gómez and Juan Carlos García-Palomares

Transport, Infrastructure, and Territory Research Group (t-GIS), Human Geography Department, Faculty of Geography and History, Universidad Complutense de Madrid (UCM), Madrid, Spain

ABSTRACT

The map presented in this paper shows the effect of congestion on daily accessibility in the London metropolitan area on Wednesdays. Because of its dynamic nature, it is challenging to both calculate the effects of this phenomenon and to represent it clearly on simple maps. Although we can use many traditional techniques for this purpose, they are usually static, and they may lose some essential information on the effects studied. In this paper, we used two cartographic techniques rarely used in accessibility studies – cartograms and 3D maps, which we believe can achieve a more striking representation in static and animations of both the traffic-induced spatial distortion and the accessibility levels obtained. The results are presented in two animated maps and some snapshots of them – static maps. Both types of maps reinforce each other: Together, they can properly show the direct space–time link between congestion and accessibility, and can, therefore, give a more detailed overview of the consequences of this phenomenon.

ARTICLE HISTORY

Received 28 July 2016
Revised 13 February 2017
Accepted 7 March 2017

KEYWORDS

Dynamic maps; 3D maps; time cartogram; dynamic accessibility; congestion; London

1. Introduction

Accessibility is a key concept in land use and transport policies across the world. Several recent reviews have highlighted the huge importance of accessibility for policy-makers and society, transport geography, and other research areas, and have proposed new research challenges (see Geurs, De Montis, & Reggiani, 2015; Páez, Scott, & Morency, 2012; van Wee, 2016). Although accessibility has been used as an indicator in many spatial scopes and from various perspectives, it is usually used in the context of static studies. In other words, most accessibility studies consider each variable as a single and static value within each study scenario. With regard to accessibility studies, one of the challenges faced by tomorrow's (or even today's) researchers is to improve space–time data input methods (Geurs & van Wee, 2004).

Accessibility is a dynamic attribute of location/person. It truly changes over time due to changes in travel times caused by changes in the transport network (e.g. congestion, disruptions...), to changes in opportunities, for example, opening hours, or changes in individual mobility capabilities. So, accessibility could be used to measure impacts of dynamic effects on territories, for example, congestion or changes in levels of service in metropolitan areas. Indeed, congestion assessment, being directly related to evaluating the importance of the robustness, reliability, vulnerability, resilience, or flexibility of the transport system (van

Wee, 2016), will underpin future accessibility studies. Until recently, dynamic data was very scarce but now Information and Communication Technologies (ICT) are greatly facilitating access to it. Companies such as TomTom, Inrix, or Be-Mobile, or accessed freely and easily from Here, Google Maps/Transit, or OpenStreetMaps supply it – some cases by new standardization templates, for example, Google Transit Feed Specification (GTFS). On the other hand, dynamic data are larger than traditional data. We can properly use them by Big Data techniques and increased calculation capacity, for example, cloud-computing. These technological improvements have led to a growing field of research involving time-of-day variations in private and public transit accessibility (Geurs et al., 2015).

An increasing number of studies have focused on the effects of time variations in transport system performance on accessibility. However, road congestion studies are still based on static scenario comparison methods. These papers generally consider some peak (unrealistic) and off-peak (based on legal or free flow conditions) moments and base their comparison of accessibility in these scenarios on the assumption of unvarying road network performance. This methodology has been used to describe the spatial structure of vehicle accessibility to towns and railway stations during peak and off-peak hours in Belgium (Vandembulcke, Steenberghen, & Thomas, 2009), and the spatial distribution of car travel times in the Greater Toronto

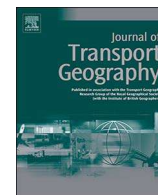
CONTACT Borja Moya-Gómez bmoyagomez@ucm.es Transport, Infrastructure, and Territory Research Group (t-GIS), Human Geography Department, Faculty of Geography and History, Universidad Complutense de Madrid (UCM), c/ Profesor Aranguren S/N, 28040 Madrid, Spain

Supplemental data for this article can be accessed here: <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2017.1305301>

© 2017 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- accessibility indicators. *Journal of Transport Geography*, 25, 141–153. doi:10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016
- Pérez, E. O., Quintana, S. M., & Pastor, I. O. (2011). Road and railway accessibility Atlas of Spain. *Journal of Maps*, 7(1), 31–41. doi:10.4113/jom.2011.1167
- Salonen, M., & Toivonen, T. (2013). Modelling travel time in urban networks: Comparable measures for private car and public transport. *Journal of Transport Geography*, 31, 143–153. doi:10.1016/j.jtrangeo.2013.06.011
- Shimizu, E., & Inoue, R. (2009). A new algorithm for distance cartogram construction. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(11), 1453–1470. doi:10.1080/13658810802186882
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (1994). The shrinking continent: New time – space maps of Europe. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21(6), 653–673. doi:10.1068/b210653
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (1996). Trans-European networks and unequal accessibility. *European Journal of Regional Development*, 4(96), 35–42.
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (1999). Freedom from the tyranny of zones: Towards New GIS-based spatial models. In A. S. Fotheringham, & M. Wegener (Eds.), *Spatial models and GIS: New potential and New models* (pp. 45–61). London: Taylor and Francis.
- Sweet, M. N., Harrison, C. J., & Kanaroglou, P. S. (2015). Gridlock in the greater Toronto area: Its geography and intensity during key periods. *Applied Geography*, 58, 167–178. doi:10.1016/j.apgeog.2015.01.011
- TomTom. (2013). *TomTom European traffic index*. Retrieved from <http://www.tomtom.com/lib/doc/trafficindex/2013-0129-TomTomCongestion-Index-2012-Q3europe-km.pdf>
- Ullah, R., & Kraak, M.-J. (2014). An alternative method to constructing time cartograms for the visual representation of scheduled movement data. *Journal of Maps*, (July 2014), 1–14. doi:10.1080/17445647.2014.935502
- Vandenbulcke, G., Steenberghen, T., & Thomas, I. (2009). Mapping accessibility in Belgium: A tool for land-use and transport planning? *Journal of Transport Geography*, 17(1), 39–53. doi:10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008
- van Wee, B. (2016). Accessible accessibility research challenges. *Journal of Transport Geography*, 51, 9–16. doi:10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018
- Yiannakoulis, N., Bland, W., & Svenson, L. W. (2013). Estimating the effect of turn penalties and traffic congestion on measuring spatial accessibility to primary health care. *Applied Geography*, 39, 172–182. doi:10.1016/j.apgeog.2012.12.003



The impacts of congestion on automobile accessibility. What happens in large European cities?



Borja Moya-Gómez*, Juan Carlos García-Palomares

Transport, Infrastructure and Territory Research Group (t-GIS), Human Geography Department, Faculty of Geography and History, Universidad Complutense de Madrid (UCM), c/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Congestion
Dynamic territorial automobile accessibility
European cities
Global navigation satellite system data
GIS

ABSTRACT

Every day, a significant part of the population in large cities suffers transport congestion. One effect of this is a change in the spatial distribution of accessibility, which may lead to people or businesses finding themselves temporally in areas where accessibility values are lower than either desired or required. This paper studies changes in automobile accessibility over the course of the day, as caused by congestion of the road network in eight metropolitan areas of the European Union: London, Paris, Madrid, Berlin, Barcelona, Rome, Hamburg and Milan. The study was carried out using millions of data points on real speeds on segments of the road networks gathered over the course of two years from TomTom® devices, which provided for the incorporation of a dynamic perspective of accessibility. In each of the areas studied, the different impacts of congestion on automobile accessibility can be observed from differences in the distribution of opportunities and the provision of infrastructures, as well as from differences in culture and customs. Despite these differences, all cities experience two peaks with a lower value during the morning and afternoon. However, results show differences in the intensity and form of the effects of congestion on accessibility in these metropolitan areas. London, Paris and Rome are the cities where congestion has the greatest impact on automobile accessibility, while the Spanish cities are hardly affected by it.

1. Introduction

Congestion is a problem of the land use/transport/society system. It is usually associated with large metropolitan areas, where the land is a very scarce and highly valuable resource, owing to the basis of their development: the high concentration of people, activities and services (Rode et al., 2014). Congestion seems to be inherent to agglomeration. Therefore, cities usually demand that the infrastructure networks, and their auxiliary venues, such as parking lots, consume the minimum but necessary land, in order to allow them to function properly. A notable aspect of this trade-off in land-use distribution is the tolerance of congestion, since this may become a major obstacle for the development of cities. Some authors assert that the limits of a city or urban region are determined by congestion (Gospodini, 2002; Turok and Mykhnenko, 2007) as the benefits from the concentration of activities may not be sufficient to compensate for the congestion costs (Batty, 2008; Louf and Barthelemy, 2014).

In 2011, each automobile commuter in the major cities of the United States spent 38 h and 19 gal (~72 l) of petrol as a result of congestion, a cost of \$818 per traveller for the year (Schrank et al.,

2012). In the largest cities of the European Union (EU), time spent due to congestion over the year for standard 30-minute automobile journeys in 2012 ranged from the 59 h, as observed in Madrid, to 97 h in Paris and in Rome (TomTom, 2013a). In economic terms, the annual cost of congestion in the EU was estimated to be 1% of the GDP (Christidis and Ibáñez Rivas, 2012).¹ Congestion also has other negative externalities, such as increased levels of noise, pollution and the potential for accidents and lower life cycles for vehicles (OECD, 1999) and the capacity of the network to cope with incidents (its resiliency). Although congestion is associated with private transport, it could severely affect public road transport services and the social groups dependent on them, as well.

Since the temporal imbalance between demand and infrastructure capacity creates congestion (Ortúzar and Willumsen, 2011), many solutions have been based on increasing network capacity, e.g. new lanes or roads. This type of solution may perpetuate the problem, and even exacerbate or spread it, to other parts of the network and relationships: the “vicious cycle” of congestion (Handy, 1993). It could also create new problems, interfere with bus and pedestrian itineraries, or damage natural ecosystems (Litman, 2014). Congestion could trigger some sort

* Corresponding author.

E-mail addresses: bmoyagomez@ucm.es (B. Moya-Gómez), jcgarcia@ghis.ucm.es (J.C. García-Palomares).

¹ All these values are based on free-flow speed, i.e. they are the upper congestion cost limit.

- West Sussex (United Kingdom).
- Owen, A., Levinson, D., 2015. Access Across America: Transit 2014.
- Owen, A., Levinson, D., Owen, A., Murphy, B., Levinson, D., 2016. Access Across America: Auto. pp. 2015.
- Páez, A., Scott, D.M., Morency, C., 2012. Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators. *J. Transp. Geogr.* 25, 141–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016>.
- Reggiani, A., Martín, J.C., 2011. Guest editorial: new frontiers in accessibility modelling: an introduction. *Netw. Spat. Econ.* 11, 577–580. <http://dx.doi.org/10.1007/s11067-011-9155-x>.
- Rode, P., Floater, G., Thomopoulos, N., Docherty, J., Schwinger, P., Mahendra, A., Fang, W., Cities, L.S.E., Friedel, B., Gomes, A., Heeckt, C., Slavcheva, R., 2014. Accessibility in Cities: Transport and Urban Form. London (the United Kingdom).
- Schrank, D., Eisele, B., Lomax, T., 2012. TTI's 2012 urban mobility report [WWW Document]. In: TTI's 2012 Urban Mobil. Rep., . <http://d2dtl5nnlpfr0r.cloudfront.net/tti.tamu.edu/documents/mobility-report-2012.pdf> (accessed 4.25.14).
- Sim, A., Yaliraki, S.N., Barahona, M., Stumpf, M.P.H., 2015. Great cities look small. *J. R. Soc. Interface* 12. <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2015.0315>.
- Stopher, P.R., 2004. Reducing road congestion: a reality check. *Transp. Policy* 11, 117–131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2003.09.002>.
- Straatemeier, T., 2008. How to plan for regional accessibility? *Transp. Policy* 15, 127–137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.002>.
- Sweet, M.N., 2014. Do firms flee traffic congestion? *J. Transp. Geogr.* 35, 40–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.01.005>.
- Sweet, M.N., 2011. Does traffic congestion slow the economy? *J. Plan. Lit.* 26, 391–404. <http://dx.doi.org/10.1177/0885412211409754>.
- Sweet, M.N., Harrison, C.J., Kanaroglou, P.S., 2015. Gridlock in the Greater Toronto Area: its geography and intensity during key periods. *Appl. Geogr.* 58, 167–178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.011>.
- Tilahun, N., Yin, S., Li, M., Keita, Y., n.d. Mapping Metropolitan Chicago's Accessibility [WWW Document]. URL <http://urbanaccessibility.com/accessibility/> (accessed 4.25.16).
- TomTom, 2013a. TomTom European Traffic Index.
- TomTom, 2013b. Speed Profiles [WWW Document]. URL http://www.tomtom.com/en_gb/licensing/products/traffic/historical-traffic/speed-profiles/#tab:tab1 (accessed 1.20.14).
- Turok, I., Mykhnenko, V., 2007. The trajectories of European cities, 1960–2005. *Cities* 24, 165–182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2007.01.007>.
- UN HABITAT, 2013. Planning and design for sustainable urban mobility. In: *Global Report on Human Settlement 2013*. United Nations, New York, NY (United States of America).
- van Wee, B., 2016. Accessible accessibility research challenges. *J. Transp. Geogr.* 51, 9–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018>.
- Vandenbulcke, G., Steenberghen, T., Thomas, I., 2009. Mapping accessibility in Belgium: a tool for land-use and transport planning? *J. Transp. Geogr.* 17, 39–53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008>.
- Weibull, J.W., 1976. An axiomatic approach to the measurement of accessibility. *Reg. Sci. Urban Econ.* 6, 357–379. [http://dx.doi.org/10.1016/0166-0462\(76\)90031-4](http://dx.doi.org/10.1016/0166-0462(76)90031-4).

Dynamic Accessibility using Big Data: The Role of the Changing Conditions of Network Congestion and Destination Attractiveness

Borja Moya-Gómez¹ · María Henar Salas-Olmedo¹ ·
Juan Carlos García-Palomares¹ · Javier Gutiérrez¹

© Springer Science+Business Media New York 2017

Abstract Accessibility is essentially a dynamic concept. However, most studies on urban accessibility take a static approach, overlooking the fact that accessibility conditions change dramatically throughout the day. Due to their high spatial and temporal resolution, the new data sources (Big Data) offer new possibilities for the study of accessibility. The aim of this paper is to analyse urban accessibility considering its two components –the performance of the transport network and the attractiveness of the destinations– using a dynamic approach using data from TomTom and Twitter respectively. This allows us to obtain profiles that highlight the daily variations in accessibility in the city of Madrid, and identify the influence of congestion and the changes in location of the population. These profiles reveal significant variations according to transport zones. Each transport zone has its own accessibility profile, and thus its own specific problems, which require solutions that are also specific.

Keywords Time-sensitive accessibility · Urban transport · TomTom · Twitter · Geographic information systems (GIS)

✉ Borja Moya-Gómez
bmoyagomez@ucm.es

María Henar Salas-Olmedo
msalas01@ucm.es

Juan Carlos García-Palomares
jcgarcia@ghis.ucm.es

Javier Gutiérrez
javiergutierrez@ghis.ucm.es

¹ Transport, Infrastructure and Territory Research Group (t-GIS), Human Geography Department, Faculty of Geography and History, Universidad Complutense de Madrid (UCM), c/Profesor Aranguren S/N, 28040 Madrid, Spain

- Owen A, Levinson DM (2015) Modeling the commute mode share of transit using continuous accessibility to jobs. *Transp Res Part A Policy Pract* 74:110–122. doi:[10.1016/j.tra.2015.02.002](https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.02.002)
- Páez A, Moniruzzaman M, Bourbonnais PL, Morency C (2013) Developing a web-based accessibility calculator prototype for the greater Montreal area. *Transp Res Part A Policy Pract* 58:103–115. doi:[10.1016/j.tra.2013.10.020](https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.020)
- Ratti C, Frenchman D, Pulselli RM, Williams S (2006) Mobile landscapes: using location data from cell phones for urban analysis. *Environ Plan B Plan Des* 33:727–748. doi:[10.1068/b32047](https://doi.org/10.1068/b32047)
- Reades J, Calabrese F, Ratti C (2009) Eigenplaces: Analysing cities using the space - time structure of the mobile phone network. *Environ Plan B Plan Des* 36:824–836. doi:[10.1068/b34133t](https://doi.org/10.1068/b34133t)
- Reggiani A, Martín JC (2011) Guest editorial: new Frontiers in accessibility modelling: an introduction. *Netw Spat Econ* 11:577–580. doi:[10.1007/s11067-011-9155-x](https://doi.org/10.1007/s11067-011-9155-x)
- Reggiani A, Bucci P, Russo G (2011) Accessibility and network structures in the German commuting. *Netw Spat Econ* 11:621–641. doi:[10.1007/s11067-010-9149-0](https://doi.org/10.1007/s11067-010-9149-0)
- Salas-Olmedo MH, Rojas-Quezada C (2016) Mapping mobility patterns to public spaces in a medium-sized city using geolocated tweets. *arXiv, Phys Soc* 10
- Shelton T, Poorthuis A, Zook M (2015) Social media and the city: rethinking urban socio-spatial inequality using user-generated geographic information. *Landsc Urban Plan* 142:198–211. doi:[10.1016/j.landurbplan.2015.02.020](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.020)
- Sweet MN (2014) Do firms flee traffic congestion? *J Transp Geogr* 35:40–49. doi:[10.1016/j.jtrangeo.2014.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.01.005)
- Sweet MN, Harrison CJ, Kanaroglou PS (2015) Gridlock in the greater Toronto area: its geography and intensity during key periods. *Appl Geogr* 58:167–178. doi:[10.1016/j.apgeog.2015.01.011](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.011)
- Vandenbulcke G, Steenberghen T, Thomas I (2009) Mapping accessibility in Belgium: a tool for land-use and transport planning? *J Transp Geogr* 17:39–53. doi:[10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008](https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008)
- van Wee B (2016) Accessible accessibility research challenges. *J Transp Geogr* 51:9–16. doi:[10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018](https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018)
- Wu L, Zhi Y, Sui Z, Liu Y (2014) Intra-urban human mobility and activity transition: evidence from social media check-in data. *PLoS One*. doi:[10.1371/journal.pone.0097010](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097010)
- Yang X, Ban XJ, Ma R (2016) Mixed equilibria with common constraints on transportation networks. *Netw Spat Econ*. doi:[10.1007/s11067-016-9335-9](https://doi.org/10.1007/s11067-016-9335-9)
- Yiannakoulis N, Bland W, Svenson LW (2013) Estimating the effect of turn penalties and traffic congestion on measuring spatial accessibility to primary health care. *Appl Geogr* 39:172–182. doi:[10.1016/j.apgeog.2012.12.003](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.003)
- Zhan X, Ukkusuri SV, Zhu F (2014) Inferring urban land use using large-scale social media check-in data. *Netw Spat Econ* 14:647–667. doi:[10.1007/s11067-014-9264-4](https://doi.org/10.1007/s11067-014-9264-4)

Esta tesis ha contado con la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto SPILLTRANS (TRA2011-27095) y a la beca FPI asociada a dicho proyecto, del Ministerio de Economía y Competitividad para la realización de dos estancias breves de la beca FPI en la Universidad de Twente -Enschede (Países Bajos)-, del Ministerio de Economía y Competitividad y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del proyecto DynAccess (TRA2015-65283-R), y de la Comunidad de Madrid a través de la red de investigación SocialBigdata-CM (H2015/HUM-3427).